



Università degli Studi di Cagliari

## **DOTTORATO DI RICERCA**

Difesa e conservazione del suolo, vulnerabilità ambientale e protezione  
idrogeologica

Ciclo XXVI

## **TITOLO TESI**

Caratterizzazione idrogeologica dell'area costiera di Arborea

Settore/i scientifico disciplinari di afferenza

GEO 05

Presentata da: Ilaria Cinzia Galiano

Coordinatore Dottorato Prof. Giorgio Ghiglieri

Tutor/Relatore Prof. Gabriele Uras

Esame finale anno accademico 2013 – 2014



Università degli Studi di Cagliari

## **DOTTORATO DI RICERCA**

Difesa e conservazione del suolo, vulnerabilità ambientale e protezione  
idrogeologica

Ciclo XXVI

## **TITOLO TESI**

Caratterizzazione idrogeologica dell'area costiera di Arborea

Settore/i scientifico disciplinari di afferenza

GEO 05

Presentata da: Ilaria Cinzia Galiano

Coordinatore Dottorato Prof. Giorgio Ghiglieri

Tutor/Relatore Prof. Gabriele Uras

Esame finale anno accademico 2013 – 2014





La presente tesi è stata prodotta durante la frequenza del Corso di Dottorato in Difesa e Conservazione del Suolo, Vulnerabilità Ambientale e Protezione Idrogeologica dell'Università degli Studi di Cagliari, a.a. 2013/2014 - XXVI ciclo, con il supporto di una borsa di studio finanziata con le risorse del P.O.R. SARDEGNA F.S.E. 2007-2013 - Obiettivo competitività regionale e occupazione, Asse IV Capitale umano, Linea di Attività I.3.1 "Finanziamento di corsi di dottorato finalizzati alla formazione di capitale umano altamente specializzato, in particolare per i settori dell'ICT, delle nanotecnologie e delle biotecnologie, dell'energia e dello sviluppo sostenibile, dell'agroalimentare e dei materiali tradizionali.

# Indice

<b>Premessa .....</b>	<b>pag.7</b>
-----------------------	--------------

## **CAPITOLO 1**

### **Area di studio**

1.1 Inquadramento geografico e geomorfologico.....	pag. 7
1.2 Inquadramento geologico.....	pag. 8
1.3 La Bonifica di Arborea.....	pag. 12
1.4 I sistemi umidi.....	pag. 18
1.5 Il settore costiero.....	pag. 19
1.6 Idrogeologia.....	pag. 20

## **CAPITOLO 2**

### **L'inquinamento da nitrati nelle acque sotterranee**

2.1 Introduzione.....	pag. 23
2.2 Normativa di riferimento.....	pag. 26
2.3 Il "problema nitrati" ad Arborea.....	pag. 28

## **CAPITOLO 3**

### **Trattazione statistica dei dati sperimentali**

3.1 Introduzione.....	pag. 32
3.2 Il variogramma.....	pag. 34
3.3 Il Kriging.....	pag. 41
3.4 La <i>cross-validation</i> .....	pag. 42
3.5 Applicazioni.....	pag. 43

## **CAPITOLO 4**

### **Dinamica dell'acquifero superficiale**

4.1 Reperimento ed elaborazione dei dati.....	pag. 44
---	---------

<u>4.1.1 Campagna fine inverno-inizio primavera 2003</u> .....	pag. 46
<u>4.1.2 Campagna primavera 2003</u> .....	pag. 48
<u>4.1.3 Campagna marzo-giugno 2003</u> .....	pag. 50
4.2 Conclusioni.....	pag. 52

## **CAPITOLO 5**

### **Analisi delle stratigrafie**

5.1 Reperimento delle stratigrafie.....	pag. 53
5.2 Analisi ed interpretazione dei dati con il metodo dell'Indicator Kriging.....	pag. 56
5.3 Analisi dettagliata delle stratigrafie.....	pag. 59

## **CAPITOLO 6**

### **I Sondaggi Elettrici Verticali (SEV)**

6.1 Introduzione.....	pag. 65
6.2 Il metodo geoelettrico.....	pag. 65
<u>6.2.1 La resistività elettrica</u> .....	pag. 65
<u>6.2.2 I Sondaggi Elettrici Verticali (SEV)</u> .....	pag. 68

## **CAPITOLO 7**

### **Interpretazione di SEV e stratigrafie**

7.1 Introduzione.....	pag. 73
7.2 Trattamento analitico dei dati.....	pag. 76
7.3 Sezioni geologiche.....	pag. 81
7.4 Interpretazioni idrogeologiche.....	pag. 86

## **CAPITOLO 8**

<b>Conclusioni.....</b>	<b>pag. 92</b>
-------------------------	----------------

<b>Bibliografia.....</b>	<b>pag. 94</b>
--------------------------	----------------

## **ALLEGATI**

# **Caratterizzazione idrogeologica dell'area costiera di Arborea**

## Premessa

Il presente lavoro ha come oggetto la caratterizzazione idrogeologica dell'area costiera di Arborea. Si tratta di una zona particolarmente interessante non solo dal punto di vista idrogeologico e geologico ma anche storico e geografico. Le attività predominanti sono l'agricoltura e , secondariamente, la zootecnia. Le aziende sono circa 300, anche se negli ultimi anni si è assistito ad un accorpamento con riduzione delle classi aziendali a minore superficie; i terreni sono coltivati prevalentemente a foraggiere avvicendate (78% della superficie a seminativo), a causa di un importante carico zootecnico che richiede un costante approvvigionamento alimentare, cui seguono le ortive (8%) ed i cereali (1%).

L'allevamento bovino, nato intorno agli anni '30, ha subito un incremento costante ed attualmente la situazione si è stabilizzata con una consistenza di circa 34.000 capi. La crescita del patrimonio zootecnico è andata di pari passo con la crescita delle famiglie degli allevatori, la cui forza lavoro è rimasta all'interno delle aziende, ed è stato perciò necessario aumentare la produzione di latte. Tutto ciò ha portato ad un'abbondante produzione di letame e liquame: mentre il primo è "palabile", cioè si può accumulare e stoccare senza rischi ambientali (richiede solo una platea impermeabilizzata), il secondo non lo è, e le aziende sono costrette a dotarsi di onerose vasche di contenimento. Entrambi gli effluenti sono usati come fertilizzanti, ma spesso l'utilizzo agronomico dell'overflow di liquame è stato gestito in modo poco oculato e poco efficiente, comportando il rischio di percolamento dei nitrati nelle falde (Criteria, 2008).

Negli ultimi anni sono stati fatti diversi studi che hanno evidenziato la presenza di nitrati in falda. La prima parte di questa tesi riguarda tale problematica, in particolare è stata studiata la dinamica dell'acquifero superficiale in modo tale da poter individuare la direzione di flusso e, quindi, poter eventualmente fornire un input per lo studio della dispersione di tale inquinante nelle acque sotterranee. Durante questa fase è stato raccolto del materiale cartografico, comprese ortofoto, implementato poi nel software ArcGIS10, dove è stato georeferenziato secondo il sistema di riferimento Roma 40. Lo studio del campo di moto dell'acquifero ha richiesto una trattazione geostatistica dei dati, che sono stati implementati nel software Surfer8.

Lo studio della dinamica dei nitrati in falda ha rivelato come l'area sia molto complessa dal punto di vista geologico, e soprattutto stratigrafico, per cui è stata avviata un'analisi approfondita della geologia, attraverso la valutazione del materiale bibliografico e l'utilizzo



di stratigrafie e SEV (Sondaggi Elettrici Verticali), questi ultimi interpretati con l'ausilio del software SEVDos; tutte queste informazioni hanno permesso di definire i limiti del bacino idrogeologico della falda superficiale e di ricostruire la geologia dell'acquifero sottostante la Bonifica di Arborea. Durante questa fase sono state studiate ed interpretate le stratigrafie, con il metodo dell'Indicator Kriging, presso il Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie di Strasburgo (LHyGeS).

Infine sono state realizzate due sezioni geologiche nelle zone di maggiore interesse attraverso il software Adobe Illustrator Artwork13.0, e sono stati interpretati i progetti dei canali che attraversano l'intera area di studio, per arrivare a definire i limiti idrostrutturali dell'acquifero superficiale.

# **Capitolo 1**

## **Area di studio**

### **1.1 Inquadramento geografico e geomorfologico**

L'area oggetto di studio della presente tesi è compresa nei Fogli 216-217 (Capo San Marco - Oristano) della Carta Geologica d'Italia dell'IGM 1:100.000, e in particolare nelle Tavole 528, 529, 538 e 539 della Carta IGM 1:25.000. Essa si estende per circa 315 km<sup>2</sup>, è situata nel Campidano centro-settentrionale, ed interessa, da Nord verso Sud, i comuni di Oristano, Santa Giusta, Palmas Arborea, Arborea, Marrubiu e Terralba; è compresa fra il Fiume Tirso a Nord, il complesso vulcanico del Monte Arci ad Est, il Rio Mogoro, gli stagni di San Giovanni e di Marceddì a Sud ed il mare del Golfo di Oristano ad Ovest. Si tratta di una vasta area depressa colmata da un intenso vulcanismo a carattere calcoalcalino, da successive potenti coperture alluvionali, accumulate nel corso di circa 2 milioni di anni grazie ai numerosi corsi d'acqua drenanti i rilievi che delimitano la piana stessa, e da sedimentazioni marino-lacustri con depositi anche di origine eolica, specie in prossimità della fascia costiera. Questa condizione morfo-strutturale del Golfo di Oristano ha determinato la formazione di un'ampia fascia di transizione, posta tra mare e continente, dominata dalla presenza di ampie aree stagnali e lagunari ed estese falcate sabbiose (Strippoli, 2011). L'attuale configurazione geologica e geomorfologica del territorio è il risultato di complesse fasi di evoluzione geodinamica e geomorfologica, le prime responsabili di fenomeni di sprofondamento tettonico e connesse manifestazioni vulcaniche Plio-quadernarie, le seconde connesse con le note oscillazioni climatiche e relative regressioni e trasgressioni marine, che hanno dato luogo ai citati processi deposizionali.

Nel Golfo di Oristano trovano sbocco alcuni tra i più importanti corsi d'acqua della Sardegna: il Tirso, il Rio Mogoro, il Rio Sitzzerri ed il Rio Flumini Mannu. Il Tirso è il più importante fiume della Sardegna; all'interno del suo bacino idrografico sono presenti 5 bacini artificiali che concorrono in misura determinante al controllo del deflusso idrico alla foce del fiume. In particolare il Lago Omodeo fu costruito con il triplice scopo di produrre energia, moderare il deflusso negli eventi di piena e come bacino di riserva idrica per l'irrigazione.

Il Rio Flumini Mannu e il Rio Sitzzerri sono due importanti corsi d'acqua che sfociano nello stagno di Marceddì. Anche il Rio Mogoro oggi sfocia nello Stagno di Marceddì, ma prima

degli interventi di bonifica e di regimazione idraulica trovava sbocco più a Nord. Esso costituiva infatti il principale corso d'acqua che alimentava una vasta zona umida, rappresentata dallo Stagno di Sassu e da un'ampia area paludosa posta immediatamente a Sud dello stagno stesso. Il Rio Mogoro, il cui bacino idrografico (398 km<sup>2</sup>) si spinge all'interno del massiccio vulcanico del Monte Arci, trae origine dalla confluenza del Rio Flumineddu e del Rio Mannu. A partire da questo punto il Rio Mogoro si dirige verso la Piana del Campidano, secondo la direzione SE-NW, per poi essere incanalato in prossimità dell'abitato di Uras e fatto defluire nello Stagno di Marceddì.

Numerosi altri corsi d'acqua minori nascono dalle pendici occidentali del Monte Arci; questi in origine alimentavano lo Stagno di Sassu, mentre in seguito agli interventi di bonifica vengono captati dal Canale delle Acque Alte (Strippoli, 2011).

## **1.2 Inquadramento geologico**

La struttura geologica della Sardegna è costituita soprattutto da plutoniti granitiche e da metamorfiti paleozoiche, in minore entità da formazioni vulcaniche e sedimentarie post-erciniche; due sono gli elementi principali: il graben sardo-campidanese, di età terziaria, esteso da Nord a Sud lungo l'asse maggiore dell'isola, ed il sistema di horst in cui si suddivide il basamento paleozoico affiorante (Pala et al., 1982).

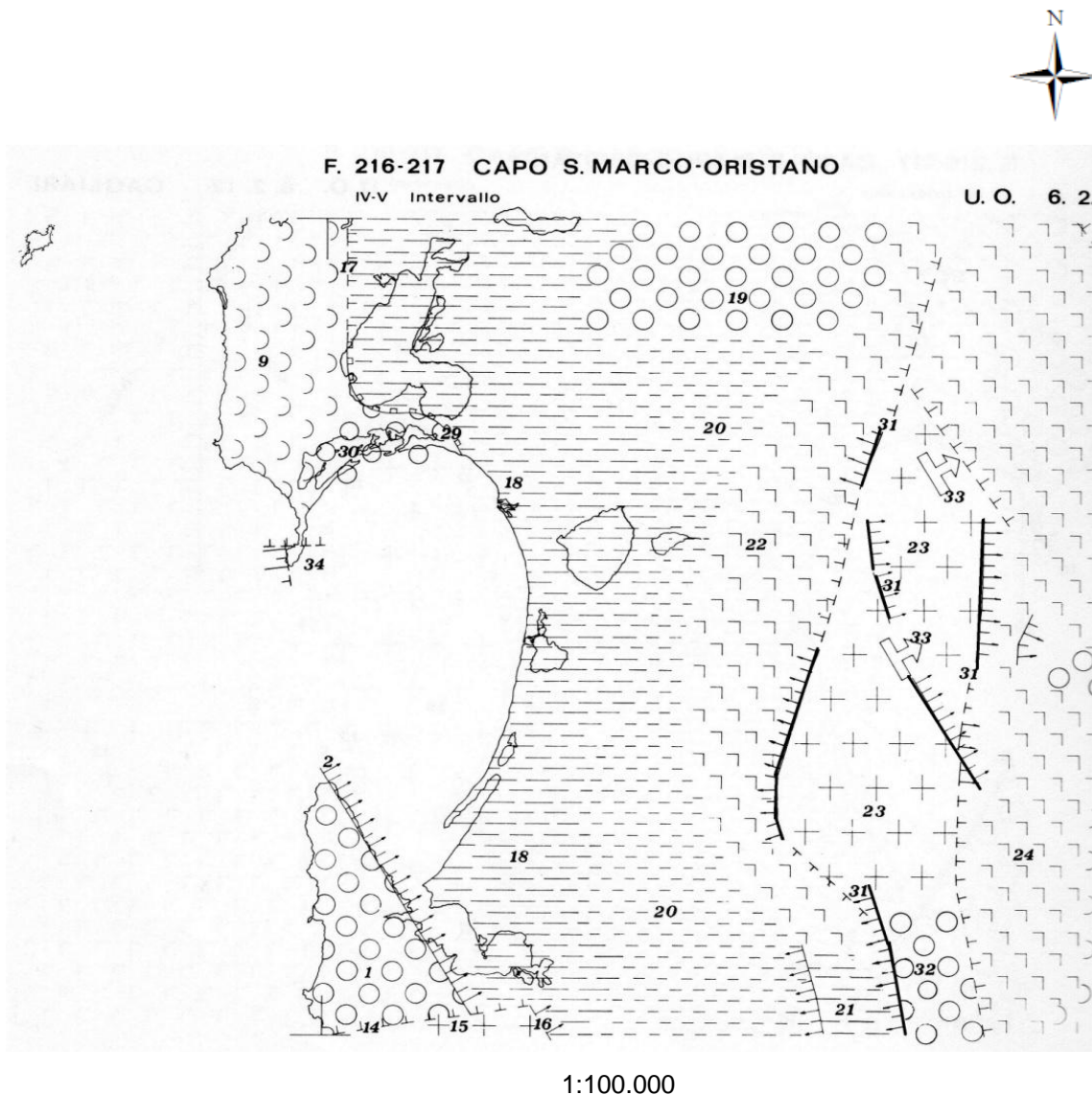
Durante l'Oligocene il massiccio sardo-corso inizia il suo movimento di deriva verso Sud-Est, nel Mediterraneo occidentale, ed una rotazione antioraria di circa 30°: la Sardegna si smembra nei suoi horst principali (occidentale ed orientale) fra i quali si crea la vasta depressione mediana allungata da Nord a Sud, il graben sardo, esteso dal Golfo dell'Asinara al Golfo di Cagliari. L'attuale configurazione dei due horst risente particolarmente di discontinuità per faglie del Terziario che ne hanno sollevato o abbassato, ed eventualmente traslato, i vari blocchi. Sono inoltre presenti nell'isola fratture paleozoiche le cui conseguenze morfologiche più evidenti appartengono alla tettonica distensiva terziaria, nella quale prevalgono i lineamenti cosiddetti campidanesi, orientati soprattutto NW-SE e subordinatamente N-S (Pala et al., 1982).

All'interno del graben ha luogo un intenso vulcanismo andesitico e riodacitico, con ignimbriti e tufi, a carattere alcalicalcico prevalente, che perdura dall'Oligocene superiore al Miocene inferiore-medio. Anche il mare oligo-miocenico contribuisce a colmare la fossa deponendo i suoi sedimenti, spesso in alternanza con le vulcaniti, per uno spessore complessivo di almeno 600-800 m. Cessati i movimenti di traslazione e rotazione, la

sedimentazione miocenica, marina sino al Messiniano inferiore, diventa lagunare e continentale probabilmente alla fine del Miocene; tuttavia si ha ancora ingressione marina durante il Pliocene inferiore, con deposizione di sabbie, marne, conglomerati ed argille (Pala et al., 1982).

Nel Pliocene medio all'estremità meridionale della fossa sarda ha inizio un nuovo ciclo di subsidenza: fra il Golfo di Oristano e il Golfo di Cagliari si forma il graben campidanese, e gli horst preesistenti subiscono un improvviso ed accentuato ringiovanimento. Nella nuova fossa si depositano sabbie, limi, ciottolami ed argille d'ambiente fluvio-lacustre (Formazione di Samassi), per uno spessore di circa 500 m, e ai suoi bordi più settentrionali inizia un vulcanismo dapprima acido (rioliti ed ossidiane del Monte Arci) poi basico (basalti), che si protrae fino al Quaternario. Il Monte Arci, a lave in maggior parte riolitiche, è una manifestazione vulcanica interessante dal punto di vista strutturale, essendo ubicata al punto d'incontro o di massima curvatura delle faglie NE-SW (rispettivamente di Nuoro e del Campidano) che tendono ad isolare il blocco paleozoico sud-orientale sardo (Pala et al., 1982) .

Cherchi et al. ritengono che l'area compresa nel Foglio 216-217 (Capo S.Marco-Oristano) sia stata interessata da movimenti neotettonici, a partire da 700 m.a. sino ad oggi. I più significativi sono riportati nella carta della figura 1.1.



**Figura 1.1 Movimenti neotettonici verificatisi a partire da 700 m.a. fino ad oggi.**

**31: faglie attive e non attive**

**23: area del monte Arci in sollevamento; fenomeni di forte erosione con faglie interne e bordiere**

**18, 20, 22: piana di Oristano, in subsidenza (Da: Cherchi et al., 1978)**

Le faglie (n.31, attive e non attive), interne e bordiere, interessano l'area del monte Arci (n.23) e sono causa di sollevamenti differenziali, posteriori alle più recenti manifestazioni vulcaniche dell'Arci. Le frecce indicano la zona in sollevamento con la punta rivolta verso la parte meno sollevata. Le aree 18, 20 e 22 rappresentano la piana di Oristano, sicuramente subsidente.

Il Campidano, situato nella Sardegna meridionale, si estende fra il golfo di Oristano ed il golfo di Cagliari. Dal punto di vista strutturale si tratta di un graben stretto e profondo, con un allineamento approssimativamente NW-SE, giacente tra due pilastri tettonici, o horst, granitico-metamorfici del Paleozoico e delimitato da faglie regionali. La profondità della parte centrale del graben è stata valutata pari a circa 3.000-5.000 m. Recenti studi hanno dimostrato che il Campidano è una depressione tettonica molto giovane (Pliocene-Quaternario) sovrapposta ad una più vasta ed antica struttura tettonica, che si estende, da Nord a Sud, dal golfo dell'Asinara al golfo di Cagliari, appartenente al complesso rift sardo dell'Oligocene-Miocene inferiore (Balìa et al., 1991), e si differenzia da quest'ultima perché contiene la "formazione di Samassi", sintettonica, tipica di un ambiente di sedimentazione in rapida subsidenza (Pala et al., 1982).

La fossa campidanese è stata colmata con sedimenti ercinici pre-rift, accumuli di resti di apparati vulcanici andesitico-ignimbritici sin-rift e da successivi sedimenti marini e continentali (Miocene-Quaternario); lave basaltiche recenti sono intercalate tra questi ultimi (Balìa et al., 1991).

Secondo la Carta Geologica la serie delle formazioni affioranti è la seguente (figura 1):

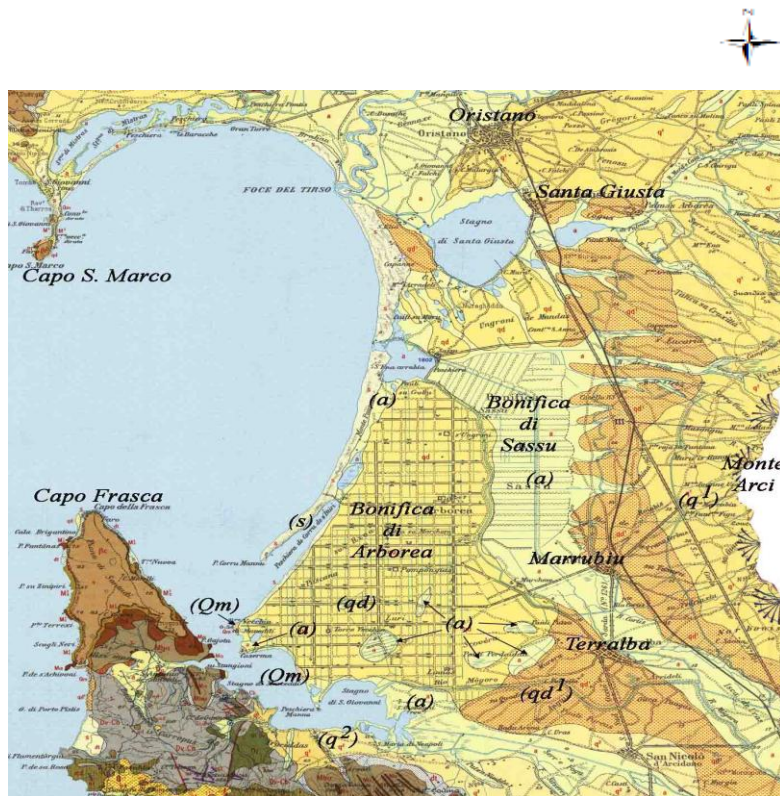
- Olocene (11,5 mila anni fa-oggi)

- Sabbie attuali e recenti delle spiagge (s) passanti a dune litoranee; si trovano lungo la costa del Golfo di Oristano.
- Alluvioni ciottoloso-sabbiose o argillose e depositi limo-argillosi palustri o salmastri (a) attuali e recenti; occupano una zona molto vasta della Piana di Oristano e si trovano prevalentemente lungo il percorso del Tirso e dei corsi d'acqua principali e attorno agli stagni.

- Pleistocene (1,806-0,0115 milioni di anni fa)

- Sabbie dunari più o meno cementate (qd) in massima parte wurmiane, a resti di Cervidi; si trovano attorno allo stagno di Cabras, a sud dello stagno di Santa Giusta e nel territorio di Arborea.
- Depositi alluvionali ciottoloso-sabbiosi (qd<sup>1</sup>) in prevalenza ricoperti da resti di antiche ...; si trovano nella porzione nord-occidentale, fra la linea di costa e lo stagno di S.Giusta, la zona fra Terralba e S.Nicolò d'Arcidano, S.Giusta, la zona ad est della bonifica del Sassu, Marrubiu e Terralba
- Dune probabilmente tirreniane; si trovano in aree limitate della zona di Santa Giusta e dalla zona a sud-est dello stagno si estendono fino alla zona di Terralba.

- Depositi alluvionali ciottolosi ( $q^2$ ) con intercalazioni sabbiose bruno-rossastre a elementi di quarzo, granito, e scisti paleozoici, terrazzati; occupano una fascia limitata compresa tra gli abitati di Zeddiani, Nurachi e Cabras.
- Alluvioni ciottolosi ( $q^1$ ) dei terrazzi più alti, generalmente arrossati e spesso a incrostazioni calcaree e con intercalazioni argillose, a elementi di rocce paleozoiche nelle regioni del Tirso e di Santa Giusta; sono molto diffusi su tutta la piana e ne costituiscono il limite orientale.



1:100.000

**Figura 1.2 Geologia dell'area di studio (Stralcio IGM 1:100.000)**

### 1.3 La bonifica di Arborea

Ai primi del '900 la Sardegna, come il resto d'Italia, si avviava verso l'industrializzazione, e allo stesso tempo, per la prima volta, si sviluppava anche un importante flusso migratorio. In questi anni fu emanato il Regio Decreto in materia di "investimenti in opere di bonifica", un invito ai privati possessori di ingenti capitali ad investirli nelle opere di bonifica dei territori più disagiati. Con la "legge Mussolini" nel 1927 si volle promuovere il risanamento e la colonizzazione di alcune aree del territorio nazionale attraverso la creazione di nuove borgate rurali. Nel 1928 in Sardegna fu fondata Mussolinia, l'attuale Arborea, al fine di risollevare l'isola dalla condizione di povertà che la

caratterizzava, iniziando dal ripopolamento. Già dalla fine dell'Ottocento la Sardegna si trovava ancora in una condizione di forte crisi agricola per via dello scarso sfruttamento dei terreni fertili, per lo più adibiti al pascolo, e per i sistemi di lavoro ancora molto primitivi. Perciò nel 1918 fu fondata la Società Anonima Bonifiche Sarde, il cui scopo era principalmente la bonifica idraulica ed agraria dei terreni. La direzione dei lavori fu affidata all'Ing. Giulio Dolcetta: la linea di intervento volse ad utilizzare le dighe e l'energia elettrica allo scopo della bonifica dei terreni paludosi, con il fine ultimo di creare imprese agricole moderne. In questo contesto nacque il concetto di "bonifica integrale", ossia un risanamento di tipo idraulico seguito dalla risoluzione di problemi di carattere agrario, per rendere vivibili e fruttuose le terre che a causa dei disordini idraulici erano deserte ed incolte (Pau, 2011). Nel 1923 iniziarono gli interventi di bonifica, che avrebbe dovuto interessare una superficie di circa 20.000 ha, di cui circa 2.000 occupati dallo Stagno di Sassu. L'area di intervento ricadeva nella piana di Terralba e Marrubiu ed oggi occupa anche tutto il territorio del nuovo Comune di Arborea.

Prima della bonifica il Rio Mogoro attraversava le pianure di Terralba e di Marrubiu per poi sfociare nello Stagno di Sassu, che veniva inoltre alimentato dalle acque provenienti dalle falde del versante occidentale del Monte Arci. Nei periodi di piena le campagne di Terralba, Uras e Marrubiu venivano fortemente danneggiate.

L'Ing. Dolcetta presentò il Progetto di massima dando così il via ai lavori seguenti:

- arginatura e deviazione del Rio Mogoro con scarico nello Stagno di San Giovanni;
- arginatura del Flumini Mannu;
- costruzione del canale allacciante delle Acque Alte di Uras;
- costruzione del canale allacciante delle Acque Alte di Marrubiu;
- costruzione del canale allacciante delle Acque Alte di Santa Giusta;
- costruzione del canale principale delle Acque Medie;
- costruzione del canale allacciante occidentale delle Acque Medie;
- costruzione del canale collettore di Sassu;
- prosciugamento meccanico dello Stagno di Sassu;
- prosciugamento delle Paludi Estius, Luri ed Arba;
- costruzione delle strade della Bonifica.

Il Rio Mogoro fu deviato a valle della linea ferroviaria (in località Isca de Uras) per essere immesso nel Flumini Mannu e fatto sfociare in mare attraverso gli stagni di San Giovanni e Marceddì. I torrenti provenienti dalle falde del Monte Arci furono allacciati in un canale delle Acque Alte all'orlo del Monte Arci tra le quote di 50 e 60 metri sul livello del mare;



questo canale fu diviso in due parti, una con pendenza verso Nord che sboccava nello Stagno di Santa Giusta, l'altra verso Sud, dove confluiva il Rio Mogoro, il quale fu deviato a mare attraverso un diversivo della lunghezza di 15 km e larghezza sul fondo di 20 m, fino allo Stagno di San Giovanni nei pressi di Santa Maria di Neapolis. Inoltre per la regimazione del Rio Mogoro fu costruito un serbatoio moderatore che poteva contenere fino a 12 milioni di metri cubi d'acqua e capace di farne defluire a valle fino a 720 al secondo, mediante una diga con un punto di altezza massima di 30 m circa; il Rio Mogoro, rallentato grazie alla diga, si allacciava ora con il canale delle Acque Alte (Provincia di Oristano, 2013).



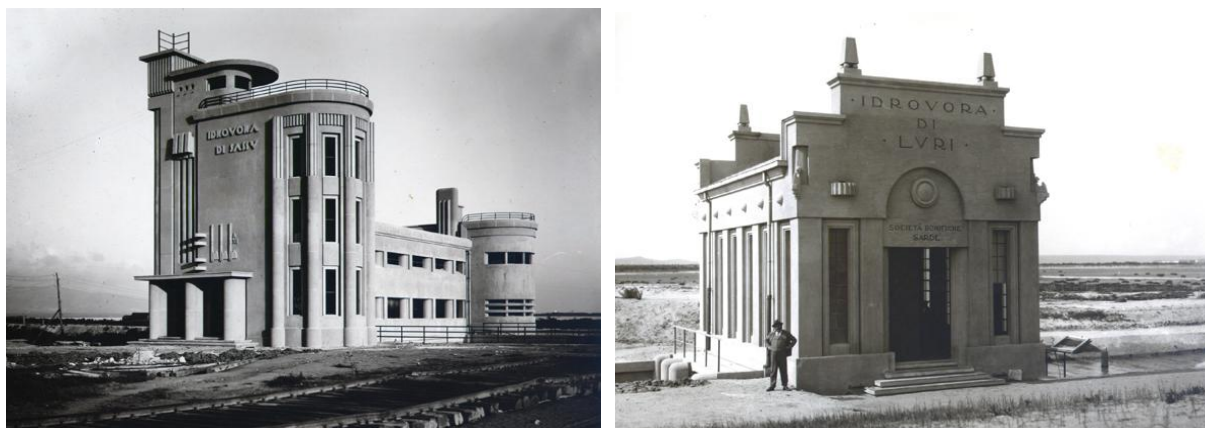
**Figura 1.3 Lavori di sistemazione del rio Mogoro (Archivio fotografico di Villa Dolcetta. Per gentile concessione della Società Bonifiche Sarde)**



**Figura 1.4 Prosciugamento dello Stagno di Sassu (Archivio fotografico di Villa Dolcetta. Per gentile concessione della Società Bonifiche Sarde)**

Arginato il problema delle acque provenienti dal Rio Mogoro e dal Monte Arci si dovevano ora prosciugare 177 stagni. Prima di tutto si procedette alle colmate degli stessi stagni con il terreno asportato dalle dune dei litorali, facendo anche defluire le acque in mare attraverso i canali di colo, tracciati contestualmente alle colmate; in alcuni casi l'impiego di pompe idrovore portatili fu un valido ausilio nel prosciugamento generale delle aree palustri. In definitiva gli stagni minori vennero bonificati mediante colmate e canali di colo; si trattava ora di prosciugare i più estesi stagni di Luri e di Sassu. Per prosciugare lo Stagno di Luri fu necessario costruire un edificio idrovoro; all'interno di questo furono installate 4 elettropompe da 40 CV per il prosciugamento invernale ; una di queste nel periodo estivo veniva utilizzata come pompa di sollevamento delle acque reflue per l'irrigazione dell'intera zona adiacente. Il restante bacino a Nord non poteva essere prosciugato naturalmente; rimaneva solo da bonificare lo stagno di Sassu, 11 milioni di m<sup>3</sup> d'acqua con un'estensione di circa 2.300 ha. Per questo veniva predisposto l'innalzamento meccanico mediante una centrale idrovora da ubicare nella peschiera Sassu, chiudendo la comunicazione dello Stagno di Sassu con la Laguna di S'Ena Arrubia e facilitando il collegamento di quest'ultima con il mare. L'edificio idrovoro era munito di 4 elettropompe; questa volta, data la maggiore portata delle acque da prosciugare, le elettropompe

avevano una potenza di 700 CV ed erano capaci di aspirare 12.000 l/s. L'idrovora di Sassu era posta alla fine del nuovo canale, lungo 11,5 km, costruito proprio nell'asse dello stesso stagno di Sassu e denominato Canale delle Acque Basse (che attualmente drena un territorio di 50 km<sup>2</sup>). Il canale si trova sotto il livello del mare e pertanto le acque, in parte anche di falda, devono essere immesse in laguna con un sistema di pompe (idrovore del Sassu) (Provinci di Oristano, 2013).



**Figura 1.5 Idrovora di Sassu e idrovora di Luri (Archivio fotografico di Villa Dolcetta. Per gentile concessione della Società Bonifiche Sarde)**

Arginate le acque alte sulla pedemontana del Monte Arci, e quelle del Rio Mogoro, e prosciugati gli stagni di Luri e Sassu, a Nord rimanevano da prosciugare due torrenti. Questi furono inalveati in un canale lungo 7 km chiamato Diversivo Sant'Anna (al limite Nord del Sassu) dal nome di uno dei torrenti, allo scopo di fungere da moderatore sulla velocità delle acque. Per non far rientrare le acque salate all'interno del diversivo Sant'Anna allo sbocco era stato costruito un ponte con 4 paratoie le quali, in caso di difficile smaltimento in mare, venivano aperte e funzionavano da collegamento sotterraneo con il canale delle Acque Basse e successivamente le acque venivano riprese dall'idrovora del Sassu. Attualmente nel diversivo Sant'Anna confluiscono numerosi torrenti che sottendono complessivamente un territorio di circa 74,5 km<sup>2</sup>.

Dopo aver proceduto con la bonifica delle zone palustri, bisognava pensare all'irrigazione dei terreni bonificati. Le acque per l'irrigazione furono prese dal fiume Tirso, mediante la diga di Santa Vittoria, che nel periodo invernale permetteva al Tirso il suo naturale corso, mentre in estate funzionava da sbarramento e faceva convogliare le acque nel canale irriguo, lungo 57 km (il Canale adduttore Tirso-Arborea; esso raccoglie le acque di irrigazione della piana di Arborea, Terralba e Marrubiu; parte da Ollastra-Simaxis, si

riunisce al canale delle Acque Medie e attraverso quest'ultimo, dopo 57 km di percorso, arriva alle campagne bonificate ). Quando tale canale nel suo corso incontrava dei torrenti le sue acque venivano spinte al di sotto del livello dei torrenti stessi mediante sifoni al fine di non interferire con il naturale corso delle acque di superficie. Questo canale irriguo si estendeva fino alla Strada 14 Est, dove era stata costruita l'Idrovora Principale di Sollevamento. Le acque venivano sollevate di 6 m con elettropompe della potenza di 700 CV per poter irrigare anche i terreni al di sopra del livello del mare. Tale idrovora è rimasta in funzione fino alla fine degli anni '80, per poi essere sostituita da un'altra più recente nei pressi della Strada 22 (Provincia di Oristano, 2013).

L'Adduttore irriguo Tirso-Arborea non è stato mai ultimato nella sua porzione terminale e pertanto, durante le piene, si verificano quasi sempre degli allagamenti più o meno estesi. L'idrovora di Sassu compie ancora oggi la funzione di sollevamento delle acque del canale delle Acque Alte per poterle poi scaricare nello stagno di S'Ena Arrubia. L'idrovora di Luri oggi non è più in esercizio, è stata sostituita da un'idrovora di recente costruzione ubicata nelle aree retrostanti a quella storica, mentre nella sua funzione di sollevamento delle acque irrigue è stata sostituita da una nuova centrale di sollevamento posta al di là della strada che costeggia l'idrovora stessa (Pau, 2011).

Attualmente si riconoscono due settori distinti dal punto di vista geolitologico, la Piana di Arborea, costituita da depositi sabbiosi, e la Piana del Sassu, costituita da depositi limosi ed argillosi. Tali depositi richiamano l'origine geomorfologica delle superfici: infatti Arborea costituiva, prima della bonifica, un ampio campo dunare sviluppatosi sulle antiche formazioni alluvionali terrazzate del Tirso; la Piana del Sassu invece costituiva una vasta depressione stagnale connessa geneticamente con la colmata olocenica dell'antico tracciato fluviale del Rio Mogoro e dei numerosi corsi d'acqua che drenano il versante occidentale del Monte Arci. Agli effetti della bonifica i due territori hanno richiesto azioni ed opere differenti: la Piana di Arborea è stata bonificata grazie allo spianamento delle formazioni dunari ed al relativo colmamento delle depressioni umide; per la bonifica del Sassu c'è voluto un grande sforzo tecnico ed economico in quanto il drenaggio dei terreni, molto impermeabili per via dell'alto contenuto argilloso, è stato ottenuto grazie alla realizzazione di una fitta rete di canali colatori che definiscono un efficiente sistema di drenaggio superficiale.

Oggi la Piana di Arborea e quella del Sassu rappresentano uno straordinario esempio di bonifica idraulica e conseguente organizzazione fondiaria unici in Sardegna, e gli interventi realizzati hanno principalmente la funzione di rendere i terreni coltivabili, ma presentano

delle criticità, come la perdita progressiva dell'efficienza idraulica del sistema dei canali colatori e la scomparsa degli stessi in seguito ad iniziative di privati. Nel quadro di funzionamento complessivo della bonifica lo Stagno di S'Ena Arrubia rappresenta un importante bacino di smaltimento delle acque di drenaggio superficiale e di laminazione delle piene (Strippoli, 2011).

#### **1.4 I sistemi umidi**

Nel Golfo di Oristano sono presenti tra le più ampie e meglio conservate zone umide della Sardegna. Dal punto di vista genetico-evolutivo si tratta di lagune salmastre (Corru S'Ittiri) e stagni di origine fluvio-marina (S'Ena Arrubia, che rappresenta la porzione residuale di una vasta area stagnale di origine fluviale). Le dinamiche fluviali e marine determinano, all'interno delle zone umide, la formazione di canali di circolazione idrica, che assicurano un ricambio idrico più o meno significativo. La salinità delle acque varia notevolmente da zona a zona: risulta dolce nelle aree più prossime alle interferenze fluviali mentre aumenta progressivamente di salinità nelle aree periferiche sempre più con caratteristiche stagnali.

La Laguna di Corru S'Ittiri si colloca nel settore meridionale del Golfo di Oristano, al confine con la Bonifica di Arborea, non ha immissari naturali ma riceve le acque che provengono dalla piana; presenta una forma allungata in direzione NE-SW e deve la sua origine alla freccia litorale sabbiosa di Corru Mannu, che si è sviluppata parallelamente alla linea di costa determinando così la formazione di una stretta insenatura occupata dalla laguna. Essa è caratterizzata da una fascia propriamente costiera in corrispondenza della freccia litorale che separa la laguna dal mare, nella quale si riconosce un'ampia zona occupata da una spiaggia interna con un sistema di dune litorali e una depressione palustre retrodunale. Nella costa opposta la riva è occupata da affioramenti rocciosi riconducibili a depositi della panchina tirreniana. Alle spalle dell'area lagunare si estende l'ampia zona bonificata di Arborea che ne delimita il perimetro verso terra.

Lo Stagno di S'Ena Arrubia è una zona umida fortemente condizionata dalla bonifica idraulica che ha interessato l'area circostante; è ciò che rimane del grande complesso stagnale e lagunare di Sassu, di cui rappresenta la zona non bonificata. Il Sassu rappresenta la colmata alluvionale del paleoalveo inciso dal Rio Mogoro, e da esso era originariamente alimentato, poi tale fiume è stato regimato e rettificato verso lo Stagno di San Giovanni. L'alimentazione idrica di S'Ena Arrubia, che non possiede immissari

naturali, avviene perlopiù attraverso il sistema di canali che drenano la piana: in particolare esso riceve le acque di un bacino di circa 45 km<sup>2</sup>. L'area stagnale risulta inoltre alimentata dai deflussi idrici sotterranei riferibili alla falda freatica, che provengono dal settore orientale della piana (Comune di Arborea, 2008).

## **1.5 Il settore costiero**

Dal punto di vista geomorfologico il margine costiero può essere suddiviso in tre settori differenti: la freccia litoranea di Corru Mannu, il settore di Marceddì e il cordone di spiaggia di Arborea.

La freccia litoranea di Corru Mannu costituisce una penisola sabbiosa originata dalla corrente di deriva litorale che, scorrendo da Nord verso Sud, trasporta grandi quantità di materiale detritico immesso in mare dal Fiume Tirso e lo disperde lungo l'intero arco centromeridionale del Golfo di Oristano. L'accrescimento e l'evoluzione della freccia litoranea dipendono dalla disponibilità sedimentaria e dal regime energetico sottocosta. La realizzazione di importanti opere, come il porto industriale di Oristano e i moli foranei delle bocche della laguna di Corru S'lttiri, hanno alterato il regime delle correnti con conseguente tendenza del settore costiero ad un adeguamento al nuovo regime energetico, con fenomeni di erosione evidenti soprattutto nelle porzioni di spiaggia sottoflusso rispetto ai moli foranei. Inoltre anche gli apporti detritici del Tirso sono notevolmente ridotti in seguito alla realizzazione di sbarramenti artificiali che ne intercettano il deflusso solido.

Il settore di Marceddì è caratterizzato da un tratto di costa bassa rocciosa e limoso-sabbiosa in cui si riconoscono, sia nel settore emerso che in quello sommerso, piattaforme di abrasione marina scolpite sulle formazioni arenacee della panchina tirreniana. La piattaforma in roccia presente nel settore emerso è spesso occupata da depressioni umide temporanee con grado di salinità molto elevato.

Il cordone di spiaggia di Arborea è costituito da sabbie litorali a granulometria media con una componente grossolana significativa, derivanti dallo smantellamento dei depositi alluvionali olocenici e pleistocenici della conoide antica del Fiume Tirso. La spiaggia si sviluppa per circa 7 km ed è caratterizzata da un settore di spiaggia emersa profonda mediamente 20 metri, quasi interamente rappresentata dall'avanspiaggia, il cui limite interno corrisponde con il piede della duna. Questo assetto morfologico evidenzia un disequilibrio morfologico e sedimentario del sistema sabbioso imputabile ai ridotti apporti

sedimentari ad opera dei corsi d'acqua all'interno del Golfo di Oristano. Le dune sono formate da depositi eolici stabilizzati da formazioni erbacee, scarsamente sviluppate in altezza ma con un discreto sviluppo trasversale ed una certa continuità longitudinale, anche se non mancano frequenti interruzioni in genere imputabili alla presenza di strutture ricettive o al transito pedonale per l'accesso alla spiaggia. Oltre la duna vi è una depressione retrodunale occupata dalla pineta di Arborea. La spiaggia è soggetta a frequenti accumuli di Posidonia, la cui presenza determina dissipazione dell'energia del moto ondoso e ostacolo ai processi di erosione del litorale sabbioso.

## **1.6 Idrogeologia**

Nei terreni alluvionali che caratterizzano il graben del Campidano si distinguono un acquifero superficiale di tipo freatico ed un sistema acquifero multistrato profondo confinato e semiconfinato.

Dall'analisi delle stratigrafie risulta che la falda freatica arriva in media a 10-12 m di profondità, qui si trova infatti il primo strato impermeabile di argille, potente presumibilmente 5-15 m, a bassa conducibilità idraulica. Pur presentando una certa omogeneità e continuità di facies, non si escludono delle interruzioni del letto argilloso, in particolare per via dell'esistenza di alcune centinaia di pozzi che mettono in comunicazione la prima falda con la seconda, attraverso interscambi idrici, anche se comunque limitati. Tale falda è ospitata in depositi sabbiosi superficiali costituiti da sabbie derivanti in parte dallo spianamento dell'antica morfologia della regione (dune, alluvioni), ed è particolarmente produttiva nelle alluvioni recenti sabbioso-ciottolose delle zone di pianura, depositate lungo gli alvei dei principali corsi d'acqua, il rio Mogoro ed il fiume Tirso: in tali zone infatti sono ubicate le maggiori utilizzazioni dell'acqua di falda, per irrigazione e per uso potabile.

La falda freatica è alimentata principalmente dalle precipitazioni efficaci, dalle acque di irrigazione e dalle acque di drenaggio di fiumi e torrenti, con l'eccezione del rio Mogoro, il cui alveo è stato cementato.

La superficie piezometrica indica per questa falda la presenza di un asse principale di drenaggio da est verso ovest, in corrispondenza del mare e dello stagno di Corru S'Ittiri, che raccoglie gran parte delle acque sotterranee del settore centro-orientale della falda (36,4% del totale complessivo). Gli altri corpi recettori delle acque di falda sono: lo stagno di S'Ena Arrubia, che raccoglie le acque del settore nord (11,1%); lo Stagno di Marceddi -



San Giovanni ed il Rio Mogoro, che raccolgono le acque del settore centro-meridionale (36,1%). Le acque del settore centro-orientale invece defluiscono naturalmente verso l'area dell'ex-stagno del Sassu dove generano locali emergenze a contatto con lo strato impermeabile delle argille di copertura dell'area stagnale; si ipotizza che tali emergenze siano attualmente impedita dalla presenza del Canale delle Acque Medie che intercetta il letto impermeabile dell'acquifero o vengano intercettate da alcuni prolungamenti dei canali colatori dell'area del Sassu, che sotto passano il Canale delle Acque Medie (Comune di Arborea, 2008).

Le acque della falda superficiale sono di scarsa qualità, inoltre sono estremamente vulnerabili ai fenomeni di contaminazione, perciò il loro utilizzo è limitato oggi ad usi domestici (irrigazione dei giardini, lavaggio dei piazzali, ...) con prelievi stimati attorno ai 500.000 m<sup>3</sup> annui.

A profondità superiori ai 12 m si ha una generale successione di livelli sabbiosi intercalati a banchi argillosi a bassa permeabilità; in tali formazioni si ha la presenza di una seconda falda, ospitata entro i depositi sabbiosi da fini a grossolani, delimitati a tetto ed a letto da livelli argillosi impermeabili ubicati tra 15 e 20 m di profondità.

L'utilizzo di tale falda risale agli inizi degli anni '70 quando, a fronte di un fabbisogno idrico crescente, iniziarono ad essere realizzate delle perforazioni a piccolo diametro (8-25 cm) che intercettavano le falde confinate a profondità variabili tra i 12 ed i 100 metri. Attualmente le potenzialità di questa falda sono discrete, con prelievi complessivi annui stimati intorno ai 3.000.000 di m<sup>3</sup>, che possono arrivare, nelle annate siccitose, a 4-5 milioni; il suo utilizzo è destinato unicamente al comparto zootecnico ed industriale ed a quello agricolo di soccorso (Uras et al., 2005). Per via degli emungimenti eccessivi ed incontrollati, questa falda è stata interessata da processi di salinizzazione; in genere i pozzi profondi che vi insistono sono stati realizzati senza le necessarie opere di isolamento dalla falda sovrastante e hanno pertanto determinato una connessione idraulica tra le due: ciò ha fatto sì che la contaminazione da nitrati interessasse, seppur in misura minore, anche la seconda falda, altrimenti protetta dal livello argilloso di tetto.

Nel territorio di Arborea sono stati realizzati anche alcuni pozzi privati di profondità superiori ai 30 metri, fino ad oltre 100 metri, che hanno presumibilmente intercettato falde più profonde, allo scopo di attingere da falde scarsamente sfruttate e con acque incontaminate dalle attività antropiche. Gli studi effettuati dalla Progemisa mostrano che le acque prelevate da questi pozzi presentano bassi contenuti in composti azotati ma elevati



valori in cloruri, probabilmente legati alla presenza di depositi lacustri ricchi in sali (Comune di Arborea, 2008).

## Capitolo 2

### L'inquinamento da nitrati nelle acque sotterranee

#### 2.1 Introduzione

La recente presa di coscienza dell'inquinamento ambientale ha fatto nascere la necessità di proteggere le risorse ambientali, con particolare riguardo per la risorsa *acqua sotterranea*: in termini qualitativi, tentando di prevenire i possibili fenomeni di inquinamento che invalidano l'uso di tale risorsa destinata al consumo umano, e in termini quantitativi, programmando una corretta gestione del patrimonio idrico, mirata principalmente ad evitare i fenomeni di depauperamento indotti dal sovrasfruttamento delle risorse idriche.

Per *inquinamento* delle acque sotterranee si intende la presenza di sostanze estranee tali da causare un degrado chimico e/o fisico della qualità di base delle acque stesse, non necessariamente tale da arrecare danno alla salute. L'inquinamento da fonti naturali è causato da sostanze che provengono da processi dinamici e/o idrogeochimici non indotti direttamente dall'opera dell'uomo (Civita, 2005). La qualità dell'acqua sotterranea può quindi essere influenzata da:

- fattori naturali
- fattori antropici.

I fattori naturali di inquinamento si dividono in puntuali e non puntuali: i primi sono spesso collegati a particolari assetti idrostrutturali che comportano la lisciviazione di rocce e/o minerali da parte di un acquifero, ad esempio, nell'Iglesiente, acque che restano a lungo a contatto con giacimenti di solfuri misti (Civita, 2005). Tra i fattori non puntuali uno dei più importanti è il mare, che, per lo più in caso di eccessivo sfruttamento degli acquiferi, vi penetra all'interno con il noto fenomeno dell'intrusione salina; una delle conseguenze più importanti è la salinizzazione dei suoli.

I fattori antropici provocano artificialmente modifiche chimico-fisiche delle acque sotterranee; le principali attività umane o strutture di stoccaggio che, a causa di un'errata gestione, provocano l'ingresso o lo spostamento dei contaminanti nel sottosuolo, si possono ridurre alle seguenti:

- Agricoltura
- Insediamenti civili
- Discariche di rifiuti

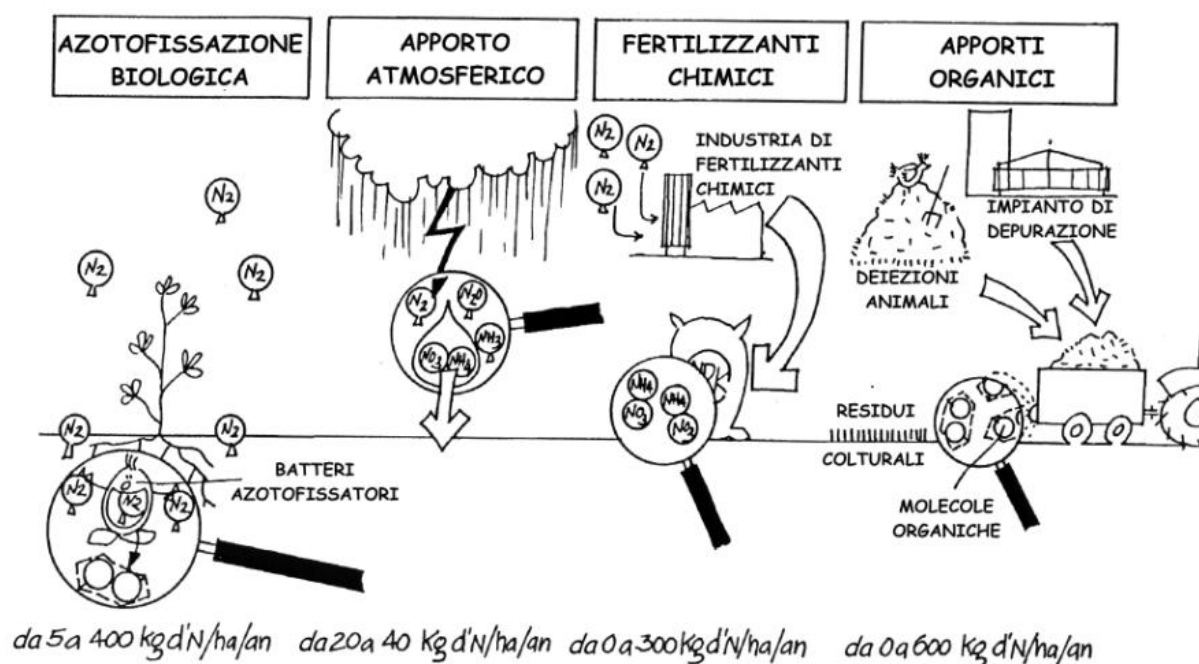
- Scarichi industriali
- Serbatoi di liquidi pericolosi e/o di carburanti
- Attività mineraria
- Strade di grande traffico
- Sovrasfruttamento della falda in zona costiera

Fortunatamente il terreno, soprattutto se poroso, effettua un'attenuazione del fenomeno, in molti casi rimuovendo o bloccando il composto chimico estraneo.

L'inquinamento antropico delle acque in genere, e di quelle sotterranee in particolare, procede da numerose fonti puntuali, dette "centri di pericolo", e da altrettanto numerose "fonti diffuse"; mentre i primi sono connessi alle attività le più varie degli insediamenti urbani ed industriali, le seconde sono di origine più spesso connessa con l'agricoltura e la zootecnia (Civita, 2005). Le più comuni sostanze inquinanti sono gli anioni, cloruri e in particolare nitrati, seguiti da metalli pesanti e cationi.

L'87% delle zone agricole europee presenta una concentrazione di nitrati nelle acque sotterranee superiore al valore guida di 25 mg/l, e di queste il 22% supera i 50 mg/l. In molte zone europee tali livelli sono in aumento e le sorgenti di acque potabili esistenti sono state chiuse o sottoposte a processi di depurazione molto costosi e a spese del consumatore (Iannarelli et al., 2009).

I nitrati sono tra i più importanti inquinanti delle acque superficiali e sotterranee; essi derivano da scarichi industriali (25%), rete fognaria civile (20%), agricoltura (18%), zootecnia (17%) (Padovani e Trevisan, 2002). In particolare, in agricoltura la tendenza verso una maggiore produttività che ha caratterizzato gli ultimi 60 anni si è accompagnata ad una intensificazione nell'uso dei fertilizzanti, in primis azoto inorganico, il cui utilizzo ha raggiunto a metà degli anni '80 picchi di 11 milioni di tonnellate, per poi scendere nell'ultimo periodo a circa 9-10 milioni di tonnellate. Globalmente la pressione dell'azoto sui suoli agricoli, proveniente soprattutto da allevamenti bovini, suini, avicoli e ovini (in forma di concime), comporta spandimenti annui di circa 8 milioni di tonnellate e quindi la pressione dell'azoto diffuso dovuta all'agricoltura raggiunge quasi 18 milioni di tonnellate (CE, 2002). Esistono anche fonti naturali di nitrati, fenomeni biologici quali la mineralizzazione e la fissazione dell'azoto atmosferico. Gli animali eliminano ed immettono nell'ambiente grosse quantità di derivati dell'azoto, che viene poi trasformato in ione ammonio ( $\text{NH}_4^+$ ) e, attraverso il processo di nitrificazione, in  $\text{NO}_3^-$ , che viene poi dilavato in falda. Mediamente si può ritenere che le concentrazioni dovute a fenomeni naturali siano dell'ordine di 10 mg/l (Tangianu, 2009).



**Figura 2.1 Fonti di azoto (GRINMED, 2010)**

Nell'ultimo secolo in Francia è scomparso il 67% delle zone umide. A partire dagli anni '50, gli stessi fenomeni si sono verificati nel Regno Unito (scomparsa dell'84% delle torbiere), in Germania e in Spagna (scomparsa rispettivamente del 57% e del 60% delle zone umide), a causa del drenaggio dei terreni agricoli, dell'impianto di alberi e delle opere di urbanizzazione. Le zone umide consentono di eliminare dall'acqua fino a 2 kg di azoto per ettaro al giorno (quasi 0,8 t per ettaro/anno) attraverso un processo naturale di denitrificazione e l'assimilazione ad opera delle piante. La loro perdita è quindi molto negativa per la qualità delle acque. Infine, la maggiore densità degli impianti di allevamento, lo stoccaggio e lo spandimento degli effluenti zootecnici ha determinato la volatilizzazione di grandi quantità di ammoniaca, che si deposita nei suoli e nelle acque circostanti, con valori fino a 50-60 kg di azoto per ettaro/anno nelle regioni ad allevamento intensivo (CE, 2002).

Dal punto di vista tossicologico, il nitrato ha una tossicità acuta estremamente bassa, e la sua pericolosità è dovuta al fatto che, una volta ingerito, viene trasformato in nitrito ad opera di microrganismi naturalmente presenti nella cavità orale e lungo il tratto intestinale. Il nitrito è dannoso perché, reagendo con sostanze prodotte dal corpo umano ed animale,

porta alla formazione di nitroso-derivati cancerogeni, come le nitrosammine. L'effetto biologico più importante dovuto al nitrito è l'ossidazione dell'emoglobina a metaemoglobina; quest'ultima non è in grado di trasportare l'ossigeno ai tessuti, e soprattutto nei neonati fino ai primi sei mesi di vita ciò causa una patologia nota come "metaemoglobinemia" ( o Blue Baby syndrome), la cui manifestazione più evidente è la colorazione bluastra delle estremità del corpo, dovuta alla cattiva ossigenazione del sangue. La metaemoglobinemia è una forma di insufficienza respiratoria che rappresenta un serio problema soprattutto nei paesi in via di sviluppo, dove la sua letalità raggiunge il 10%. Nel rapporto sulla valutazione tossicologica di nitrito e nitrato l'OMS ha più che dimezzato l'ADI (Acceptable Daily Intake) fissata nel rapporto precedente per il nitrito, portandola a 0,06 mg/kg di peso corporeo, mentre ha confermato l'ADI per il nitrato (3,65 mg/kg di peso corporeo). Per i Paesi appartenenti alla Comunità Europea, la direttiva 98/83/CE ha stabilito i limiti massimi, per le acque destinate al consumo umano, di 50 mg/l per lo ione nitrato e di 0,5 mg/l per lo ione nitrito (Merafina, 2003).

## **2.2 Normativa di riferimento**

In numerose regioni dell'Unione Europea già a partire dagli anni '80 si sono raggiunti livelli preoccupanti di nitrati nelle acque superficiali e sotterranee, inoltre è emerso che una delle cause principali dell'inquinamento delle acque è rappresentata dai nitrati di origine agricola, che derivano dall'utilizzo di fertilizzanti azotati ed effluenti di allevamento. Al fine di tutelare gli organismi e gli ecosistemi acquatici, e salvaguardare altri usi legittimi dell'acqua, sono state emanate delle direttive comunitarie, come la 91/676/CEE (Protezione delle acque dall'inquinamento da nitrati provenienti da fonti agricole, detta Direttiva nitrati), recepita in Italia con il D.Lgs. 152/1999, modificato ed integrato dal D.Lgs. 258/2000, che indica alle regioni i criteri per individuare le *zone vulnerabili*, rappresentate dalle aree che scaricano, direttamente o indirettamente, composti azotati in acque già inquinate o che potrebbero esserlo in conseguenza di tali scarichi.

La direttiva 2000/60/CE (Direttiva quadro sulle acque), modificata con la 2008/32/CE, ha istituito norme comuni a livello europeo per la protezione delle acque superficiali interne, delle acque di transizione, delle acque costiere e sotterranee indicando che i singoli bacini idrografici devono essere assegnati a distretti idrografici. Il principale obiettivo della

direttiva è quello di raggiungere lo stato buono<sup>1</sup> per tutti i corpi idrici entro il 2015. Per i corpi idrici sotterranei lo stato viene definito in base a criteri chimici e quantitativi: i primi riguardano l'intrusione salina ed altre intrusioni, l'interazione con i corpi idrici superficiali o con ecosistemi terrestri dipendenti dalle acque sotterranee, l'idoneità per il consumo umano e il non superamento degli standard di qualità fissati a livello comunitario e/o i valori soglia fissati a livello nazionale; lo stato quantitativo è definito in relazione alla sostenibilità dei prelievi rispetto alle risorse idriche sotterranee disponibili e ai trend dei livelli piezometrici. In particolare devono essere valutati gli effetti dell'alterazione del livello delle acque sotterranee sulle acque superficiali connesse, sugli ecosistemi terrestri dipendenti e sui fenomeni di intrusione salina (Regione Autonoma della Sardegna, 2010). Per ogni distretto idrografico ricadente nel proprio territorio, ciascuno stato membro deve provvedere a far predisporre un Piano di Gestione per la pianificazione, l'attuazione e il monitoraggio delle attività e delle misure da mettere in atto per il raggiungimento degli obiettivi ambientali e di sostenibilità nell'uso delle risorse idriche (Regione Autonoma della Sardegna, 2010). Il D.Lgs. 152/2006, in attuazione di tale direttiva, prevede che ogni regione debba attuare "appositi programmi di rilevamento dei dati utili a descrivere le caratteristiche del bacino idrografico e a valutare l'impatto antropico esercitato sul medesimo..." (art.118) (Regione Autonoma della Sardegna, 2010).

La direttiva 2006/118/CE, recentemente modificata con la 2014/80/UE, riguarda la protezione delle acque sotterranee dall'inquinamento e dal deterioramento, e viene recepita in Italia con il D.Lgs. 30/2009. Esso definisce misure specifiche per prevenire e controllare l'inquinamento ed il depauperamento delle acque sotterranee, i concetti di: standard di qualità, valore soglia, concentrazione di fondo, corpi idrici a rischio e acquifero; stabilisce inoltre i criteri per valutare lo stato chimico delle acque sotterranee, nonché le misure per prevenire o limitare le immissioni di inquinanti nelle stesse.

In Sardegna è in corso, dal 2002, con coordinamento a cura dell'Assessorato alla Difesa dell'Ambiente, il monitoraggio della qualità delle acque previsto dal D.Lgs. 152/99 attraverso il Piano di Tutela delle Acque (PTA). Nella redazione del PTA si è suddiviso l'intero territorio regionale in 16 Unità Idrografiche Omogenee (UIO) costituite da uno o più bacini idrografici limitrofi, a cui sono state convenzionalmente assegnate le rispettive acque superficiali interne nonché le relative acque sotterranee e marino-costiere; Arborea fa parte dell'UIO di Fluminimannu di Pabillonis-Mogoro, e l'acquifero che la interessa è

---

<sup>1</sup> Definito in funzione della capacità del corpo idrico di mantenere i processi naturali di autodepurazione e di sostenere comunità animali e vegetali ampie e ben diversificate

compreso nel complesso detritico-alluvionale plio-quadernario del Campidano, con valori della vulnerabilità da nitrati che vanno dalla classe alta a quella elevata.

In applicazione della Direttiva Nitrati la Regione Autonoma della Sardegna ha emanato una delibera, la n.1/12 del 18 gennaio 2005, secondo quanto indicato dal D.Lgs. 152/2009. Tale decreto stabilisce i criteri per individuare le zone vulnerabili alla percolazione di nitrati di origine agricola, che consistono principalmente nel considerare i carichi di azoto potenzialmente inquinanti (specie animali allevate, intensità degli allevamenti e loro tipologia, tipologia dei reflui che ne derivano e modalità di applicazione al terreno, coltivazioni e fertilizzanti in uso) ed i fattori ambientali che possono concorrere a determinare uno stato di contaminazione. In particolare viene descritto come si debba realizzare il Programma d'Azione (PA) con l'applicazione del Codice di Buona Pratica Agricola (CBPA) e il successivo programma di monitoraggio della qualità dei corpi idrici al fine di verificarne l'efficacia. Nello specifico, il PA deve contenere: periodi di divieto di spandimento di fertilizzanti; capacità di stoccaggio per effluenti di allevamento; limitazioni dell'applicazione al terreno di fertilizzanti secondo il CBPA e con il rispetto del limite di 170 kg/ha/anno di azoto da effluente zootecnico (Regione Autonoma della Sardegna, 2005).

### **2.3 Il "problema nitrati" ad Arborea**

Attualmente nel Comune di Arborea lo stato delle conoscenze sulla vulnerabilità intrinseca degli acquiferi, sulla qualità delle acque sotterranee con presenza di nitrati che superano il valore soglia di 50 mg/l, sulla presenza di allevamenti a carattere intensivo pari a circa 36.000 capi bovini e il connesso sistema di smaltimento sul terreno della totalità degli effluenti e dei reflui domestici delle aziende zootecniche, ha portato, attraverso la già citata Delibera della Giunta regionale n. 1/12 del 18/01/2005, alla delimitazione e quindi alla designazione di una parte del territorio come Zona Vulnerabile da Nitrati di Origine Agricola (ZVNOA); si tratta di un'area di circa 55 km<sup>2</sup>, delimitata a Nord dallo Stagno di S'Ena Arrubia, ad Est dal Canale delle Acque Medie, a Sud dal Rio Mogoro e dallo Stagno di San Giovanni e ad Ovest dal mare e dal sistema di lagune costiere (Criteria, 2008). La perimetrazione della ZVN è mostrata nella figura 2.2.

Programma d'Azione per le Zone Vulnerabili da Nitrati di Arborea

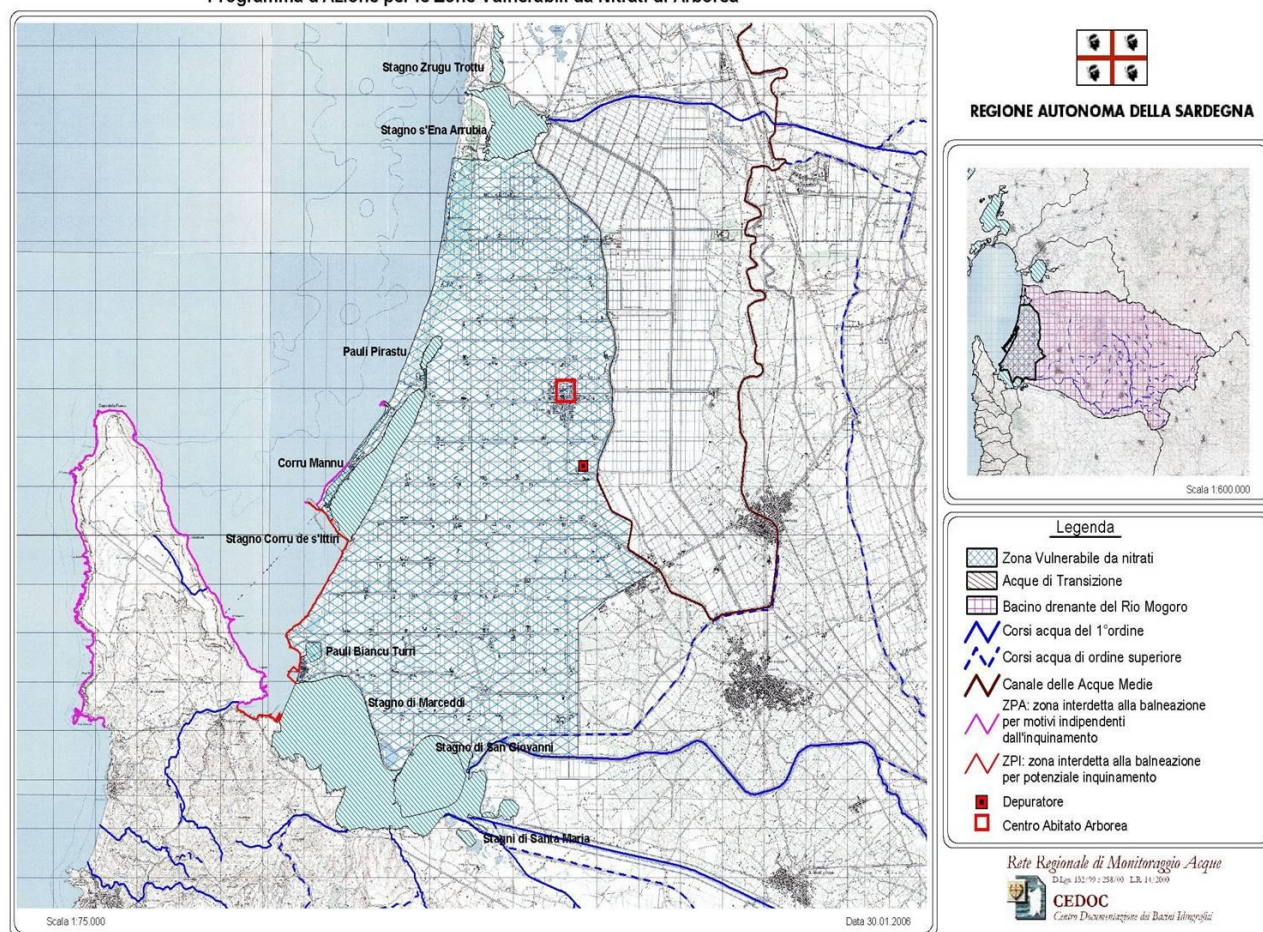


Figura 2.2 Perimetrazione della ZVN di Arborea (RAS, 2010)

Nell'ambito del progetto di ricerca "Rischio di inquinamento e prevenzione del degrado delle risorse idriche sotterranee-IDRISK", in collaborazione con il Centro Interdipartimentale di Ateneo NRD (Nucleo per la Ricerca contro la Desertificazione) dell'Università degli Studi di Sassari, è stata avviata un'attività di monitoraggio delle risorse idriche sotterranee in diverse aree, tra cui la Bonifica di Arborea.





**Figura 2.3. Alcune fasi dell'attività di monitoraggio**

Dei diversi campioni prelevati, 45 sono stati sottoposti ad analisi chimiche al fine di valutare la presenza di alcune sostanze, e in particolare dei nitrati; i risultati più significativi sono riportati nella tabella 2.1.

	A	B	C	D	E
1	ID_POZZO	DATA_MIS	NO3 (mg/l)	LONGITUDINE EST	LATITUDINE NORD
2	P12	14/10/2011	49,35	1463809,00	4406016,00
3	P13	14/10/2011	205,11	1463577,00	4405910,00
4	P26	14/10/2011	49,86	1462173,00	4404168,00
5	P41	18/10/2011	136,85	1462966,00	4403273,00
6	P48	17/10/2011	146,37	1461164,00	4401762,00
7	P77	17/10/2011	168,49	1462808,00	4400002,00
8	P116	18/10/2011	71,29	1463435,00	4396481,00
9	P118	18/10/2011	119,38	1464055,00	4396092,00
10	P124	18/10/2011	122,70	1460572,00	4396973,00
11	P132	18/10/2011	202,24	1460712,00	4396277,00
12	P184	21/10/2011	72,35	1473797,00	4396292,00
13	P215	17/10/2011	215,76	1464581,00	4404193,00
14	P283	20/10/2011	156,30	1466104,00	4398288,00
15	P296	19/10/2011	143,36	1465373,00	4409823,00
16	P324	20/10/2011	110,32	1467656,00	4400784,00
17	P354	20/10/2011	147,64	1467487,00	4396124,00

**Tabella 2.1 Concentrazione di NO<sub>3</sub><sup>-</sup> in alcuni campioni**

A parte in due casi, i valori della concentrazione dei nitrati nelle acque di falda sono nettamente superiori ai limiti di legge (50 mg/l). I pozzi da cui sono stati prelevati i

campioni d'acqua, che interessano sia la falda superficiale che quella profonda, sono distribuiti nell'area di studio come mostra la figura 2.3. Si può osservare che i valori più elevati di  $[\text{NO}_3^-]$  sono stati riscontrati proprio all'interno della ZVN e che le maggiori concentrazioni interessano la falda superficiale (P77, P132 e P215).



1:80.000

**Figura 2.3 Localizzazione dei pozzi nell'area di studio; i cerchi azzurri rappresentano quelli in cui le concentrazioni di  $\text{NO}_3^-$  superano i 200 mg/l**

## Capitolo 3

### Trattamento statistico dei dati sperimentali

#### 3.1 Introduzione

I dati raccolti durante questi anni sono stati sottoposti ad un'analisi prima statistica e poi geostatistica. Infatti, prima di poter applicare la geostatistica al risultato di una serie di analisi, bisogna verificare se i dati a disposizione seguono o meno una “distribuzione normale o gaussiana”, la cui espressione analitica è:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad \text{con } x \in \mathbb{R}$$

dove  $\sigma$  è la deviazione standard e  $\mu$  è il valor medio.

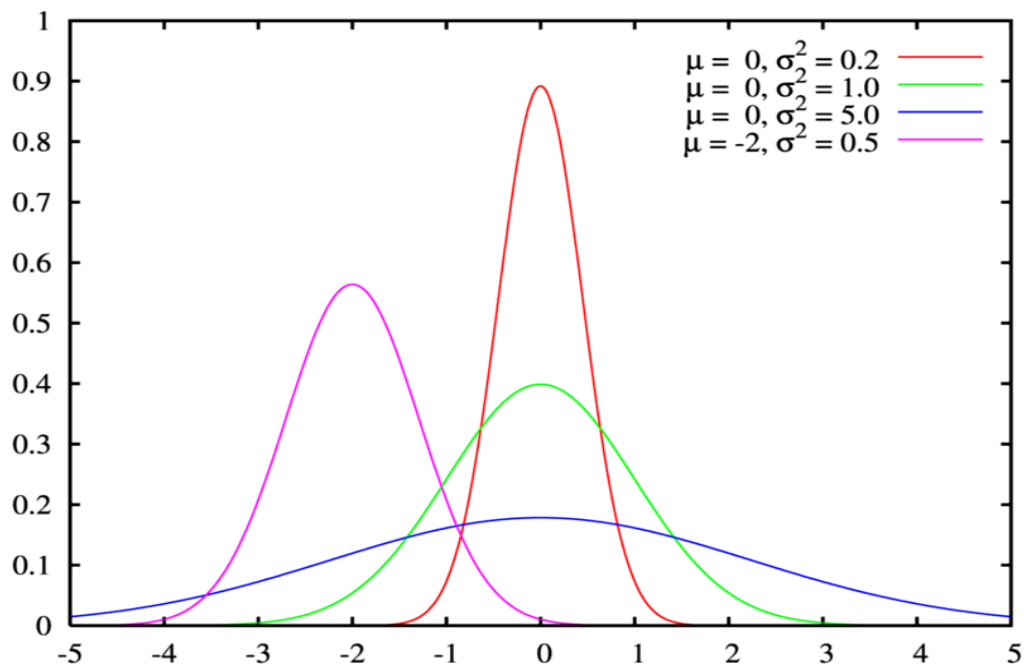
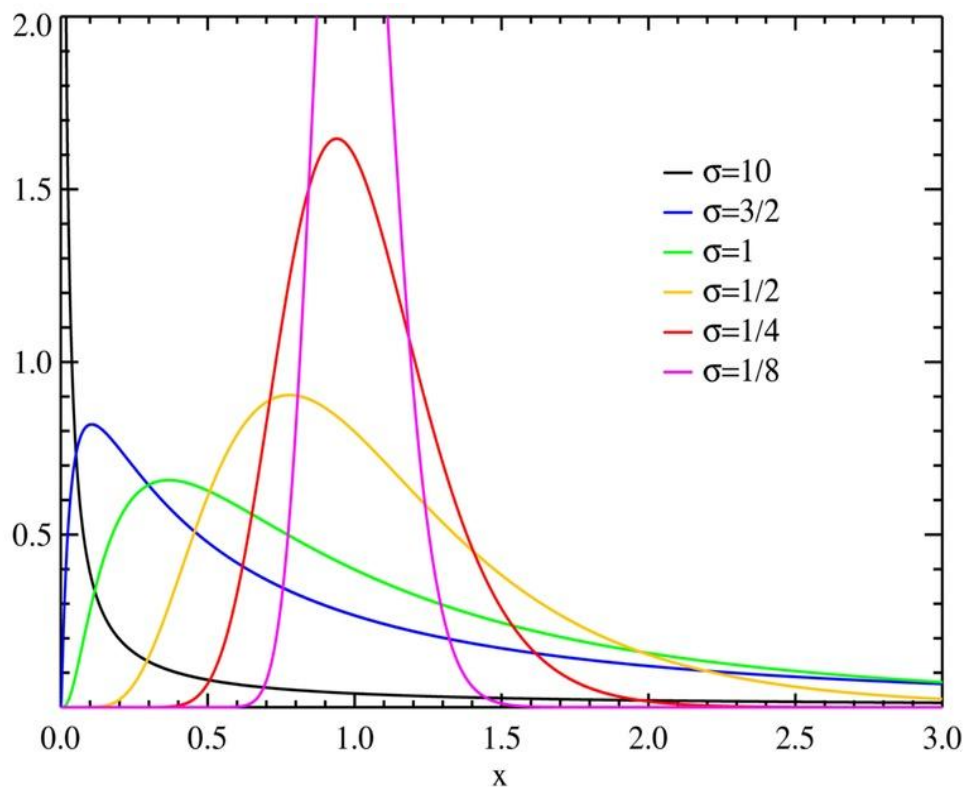


Figura 3.1 Distribuzione normale

Anche una “distribuzione log-normale” è consentita:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \frac{1}{x} e^{-\frac{1}{2\sigma^2} (\ln x - \mu)^2}$$



**Figura 3.2 Distribuzione log-normale**

La geostatistica nasce in ambito minerario con lo scopo di superare i limiti della statistica classica, in quanto nella geologia applicata si ha a che fare con fenomeni “direzionali” che presentano un “campo di esistenza”, al di fuori del quale non esistono; in questi casi la statistica classica può definire solo i parametri principali (media, deviazione standard, istogramma, presenza di dati anomali) ma non va oltre: la geostatistica è invece in grado di definire la legge spaziale che lega i campioni ed i parametri di questa legge. Il suo iniziatore è stato l’ingegnere minerario D.G.Krige: egli, analizzando i valori dei campioni di una miniera d’oro del Sud-Africa, notò delle caratteristiche che si ripetevano e su queste ipotizzò alcuni concetti teorici a partire dai quali il professor Matheron ha posto le basi della geostatistica (Mazzella, 2013). La cosa interessante è che essa consente di avere una stima dei valori della variabile in esame nei punti in cui non sono stati misurati, valendo il principio dell’autocorrelazione (due punti vicini nello spazio presentano valori di una data variabile più simili tra loro rispetto a due punti distanti). Le variabili oggetto di uno studio geostatistico sono dette “variabili regionalizzate” perché il loro valore è fortemente dipendente dalla posizione spaziale (Noti, 2011); esse possono essere isotrope (il valore della variabile non varia lungo una stessa direzione) o anisotrope (il valore della variabile varia lungo una stessa direzione).

### 3.2 Il variogramma

In geostatistica la correlazione spaziale viene descritta dal semivariogramma (così chiamato perché si considera la metà della varianza della variabile in esame). Matheron ha dimostrato che tale funzione gode di alcune proprietà che è possibile osservare se i dati sono distribuiti secondo una maglia regolare e se la loro distribuzione è normale o gaussiana. Il semivariogramma è un algoritmo geostatistico che viene impiegato per valutare l'autocorrelazione spaziale di dati osservati in punti georiferiti. La funzione semivariogramma interpola la semivarianza dei valori osservati in gruppi di coppie di punti a determinate distanze (*lag* prefissati) secondo una certa direzione, ed è una misura del grado di dipendenza spaziale tra i campioni; la sua stima si effettua in base ai dati provenienti dal campionamento. Se si hanno dati campionati secondo una maglia regolare il calcolo è molto semplice poiché, data la stazionarietà dell'incremento  $Z(x+h) - Z(x)$ , risulta immediato calcolare la funzione variogramma per una certa direzione e per un determinato lag  $h$ . Il calcolo del semivariogramma si basa sul considerare le differenze dei valori della variabile regionalizzata in due localizzazioni differenti, separate da una distanza  $h$ . La procedura è la seguente:

1. si parte facendo la differenza tra i valori  $z(x_1)$  e  $z(x_2)$ , poi tra  $z(x_2)$  e  $z(x_3)$ , fino alla coppia  $z(x_{i-1})$  e  $z(x_i)$ . Le differenze saranno uguali a  $m(x)$ , ovvero al numero di coppie di campioni per questo lag;
2. il risultato di ogni differenza si eleva al quadrato;
3. si sommano tutti i quadrati;
4. si divide questa somma per  $2m(h)$ ;
5. si ripete la stessa procedura da 1 a 4 per il secondo lag (il doppio del primo);
6. si ripete la stessa procedura da 1 a 4 per il terzo lag (tre volte il primo);
7. si ripete la procedura fino all'ultima distanza di lag che si vuole.

In genere il numero di lag che si sceglie varia da 8 a circa 20: un numero inferiore abbasserebbe il potere risolutivo del semivariogramma, un numero superiore porterebbe a considerare troppi lag oltre il massimo range di correlazione spaziale fra i dati.

Il semivariogramma viene calcolato lungo le direzioni di interesse (ad esempio,  $0^\circ$  corrisponde all'asse positivo delle  $x$ ,  $90^\circ$  all'asse positivo delle  $y$ ).

Quando la maglia di campionamento non è regolare, il calcolo del semivariogramma si presenta difficoltoso: infatti può capitare che, essendo i punti disposti in modo irregolare, in alcune direzioni non ne cada nessuno; un problema simile si presenta in caso di

anisotropie nella distribuzione spaziale dei dati. In questi casi si considerano i variogrammi direzionali, e si parla di *tolleranza angolare* o *angolo di regolarizzazione*: si considera una direzione  $r$ , individuata tramite un angolo a partire da una direzione di riferimento, con una tolleranza angolare  $\Delta\phi$ . Una tolleranza  $\Delta h$  deve anche essere data sulla distanza. Così facendo tutte le coppie aventi distanza compresa tra  $h-\Delta h$  e  $h+\Delta h$  ed allineate secondo la direzione compresa tra  $\phi-\Delta\phi$  e  $\phi+\Delta\phi$  contribuiscono al calcolo del semivariogramma. I valori delle tolleranze da adottare dipendono ovviamente dalla quantità di campioni di cui si dispone: più sono numerosi i campioni e più piccole possono essere le tolleranze, consentendo una maggior precisione nel calcolo dei variogrammi. In genere nei software di geostatistica la tolleranza angolare è posta uguale a  $22.5^\circ$  (Ciotoli, 2005). Se si considera invece un angolo di  $90^\circ$  viene coinvolto il maggior numero di coppie possibile.

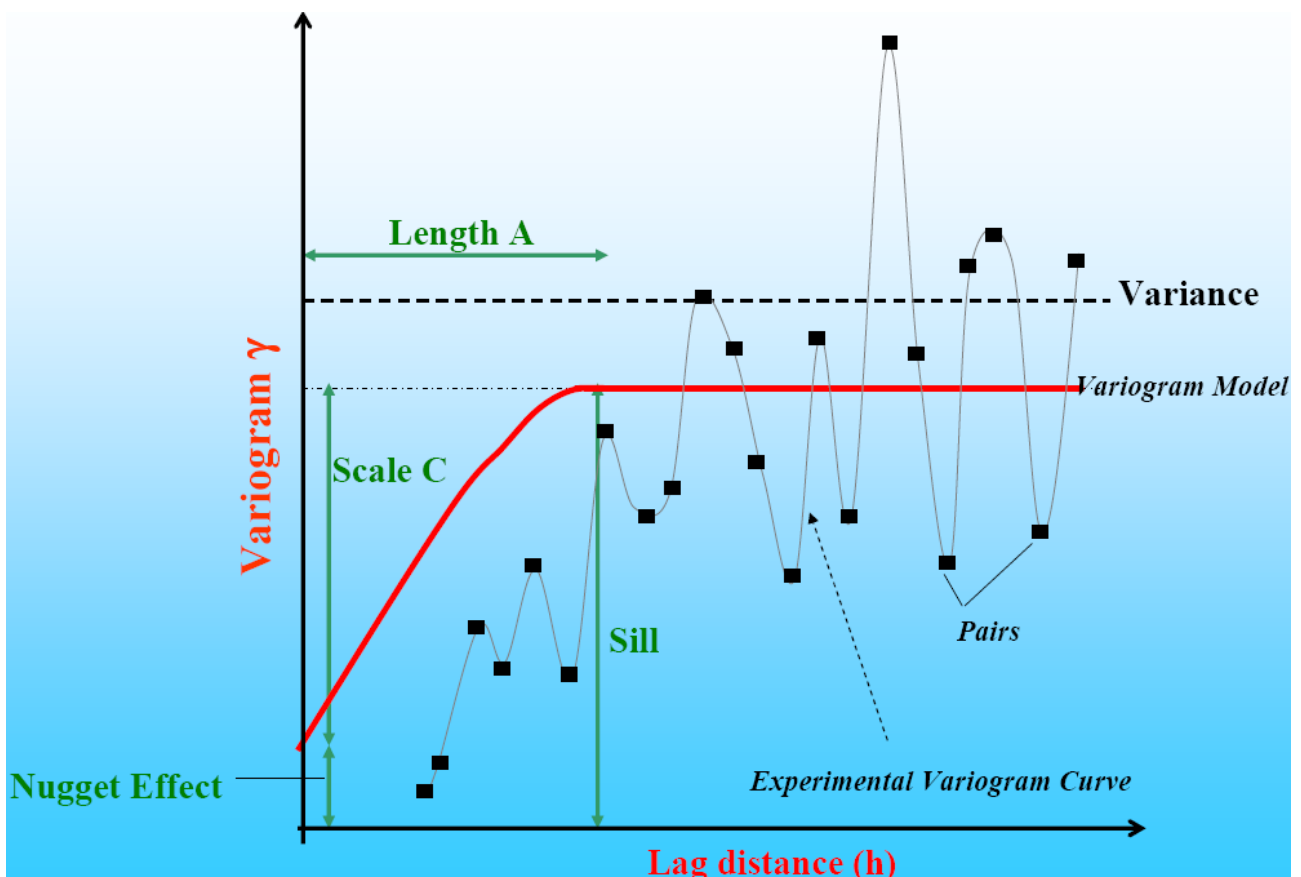


Figura 3.4 Variogramma e sue proprietà

Gli assi del semivariogramma sperimentale sono distanze tra coppie di dati (asse x) e semivarianza (asse y). Il grafico ottenuto dall'applicazione della formula è formato da una serie di punti, distanti tra loro un certo lag definito. Il semivariogramma sperimentale (punti



discreti) deve essere interpolato con diverse funzioni matematiche, in modo da determinare il tipo di autocorrelazione spaziale della variabile misurata (Penchini, 2006). Importante è il peso che hanno i vari punti sperimentali: i primi, quelli più vicini all'origine, in genere sono calcolati su un numero maggiore di coppie rispetto agli ultimi, per cui raggiunta una certa distanza questi non vengono presi in considerazione; per lo stesso motivo i primi punti sono anche quelli che hanno un peso maggiore nel processo di interpolazione

Il semivariogramma:

- è una funzione simmetrica, ciò significa che il suo valore calcolato in una direzione è uguale a quello calcolato nella direzione opposta (Mazzella, 2013);
- è una funzione positiva, in conseguenza del fatto che viene calcolato come quadrato della differenza tra i valori di due punti posti ad una certa distanza;
- il suo valore all'origine è , teoricamente, zero. In realtà si tratta di una semplificazione, perché in prossimità dell'origine il semivariogramma sperimentale assume quasi sempre valori diversi da zero (*Nugget Effect*);
- non è detto che sia sempre una funzione monotona crescente (ad esempio, possono essere stati commessi errori di campionamento);
- se l'andamento è crescente, la curva raggiunge ad un certo punto una valore soglia, oltre il quale non aumenta più, ed assume quindi un andamento costante; tale valore è detto *sill* o *palier* e corrisponde, sull'asse delle ascisse, al *range* o *length* , che rappresenta nella pratica il raggio della zona di influenza dei campioni (superato tale valore i campioni cessano di essere interdipendenti). In generale è meglio avere un range grande, che sta ad indicare una buona correlazione spaziale dei campioni per grandi distanze. Il *sill* è l'unica differenza quadratica media alla quale non si osservano più differenze significative fra i valori dei campioni. In generale è meglio avere un valore di soglia basso, che non superi la varianza, ciò indica che c'è una bassa variabilità fra i dati ;
- il *nugget effect* o “effetto pepita” rappresenta il valore della funzione per una distanza fra le coppie di punti campionati uguale a zero. Esso indica la variabilità campionaria per distanze molto piccole, variabilità che può essere originata da variazioni geologiche o mineralogiche a piccola scala oppure dalla presenza di errori di misura e/o di campionamento. Il valore del *nugget* non deve superare 1/3 del valore del *sill*. Se la curva del variogramma sperimentale passa per l'origine degli assi, allora si può dire che la variabilità dei campioni nello spazio non è influenzata da fattori geologici, né esiste un

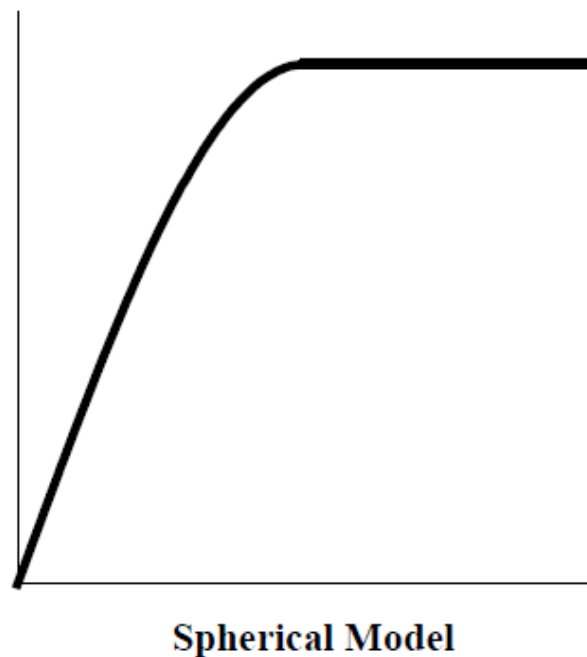
errore di campionamento o di posizione. È tuttavia molto raro per un variogramma sperimentale non avere un *nugget* (Ciotoli, 2005).

Una volta fatto il grafico dei risultati si ottiene il cosiddetto “variogramma sperimentale”; esso si presenta generalmente molto irregolare. Per riuscire ad ottenere delle informazioni va pertanto trattato con un processo detto “modellizzazione”, che permette di ottenere il “variogramma modello”. La fase di modellizzazione è critica, in quanto si deve scegliere la curva che meglio approssimi l'insieme di punti che formano il variogramma sperimentale. La procedura di *fitting model* è complessa perché l'accuratezza delle semivarianze osservate non è costante, e il grafico può presentare un andamento molto irregolare. Sarebbe perciò opportuno seguire i passaggi sotto indicati:

- 1- si traccia il variogramma sperimentale;
- 2- si sceglie uno o più modelli tra quelli disponibili la cui forma approssimi quella del variogramma sperimentale;
- 3- si adatta il modello attraverso procedure statistiche di minimizzazione degli errori;
- 4- si valuta la bontà del risultato analizzando l'aspetto grafico (Penchini, 2006).

Esistono vari tipi di modelli per l'approssimazione dei variogrammi sperimentali. I più comuni sono i seguenti:

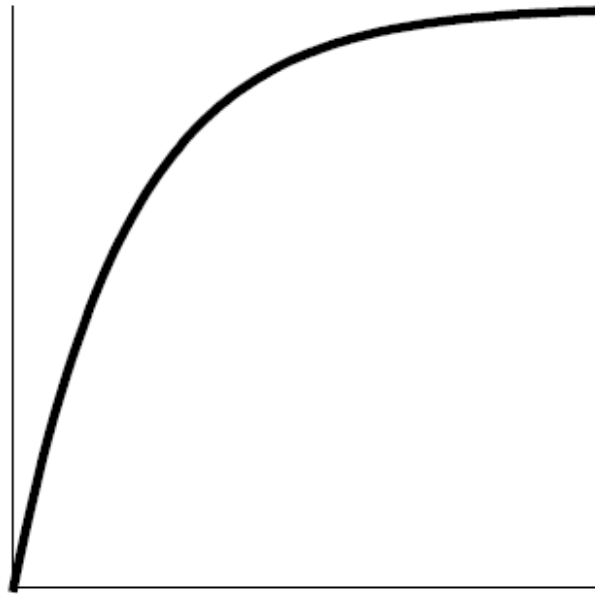
- **modello sferico o di Matheron.** Il più utilizzato, ha un comportamento lineare in prossimità dell'origine e presenta un *range* e l'effetto *nugget* (Mazzella, 2013);



**Spherical Model**  
Figura 3.5 Modello sferico



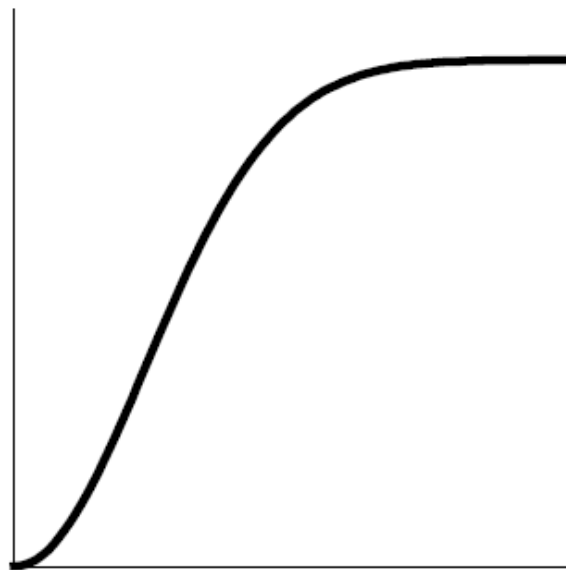
- **modello esponenziale.** Raggiunge la soglia in modo asintotico, e possiede un range definito come la distanza alla quale il valore della funzione corrisponde al 95% della soglia. Anche il modello esponenziale, come quello sferico, mostra un comportamento lineare all'origine, per poi aumentare e raggiungere il plateau più gradualmente (Ciotoli, 2005);



**Exponential Model**

**Figura 3.6 Modello esponenziale**

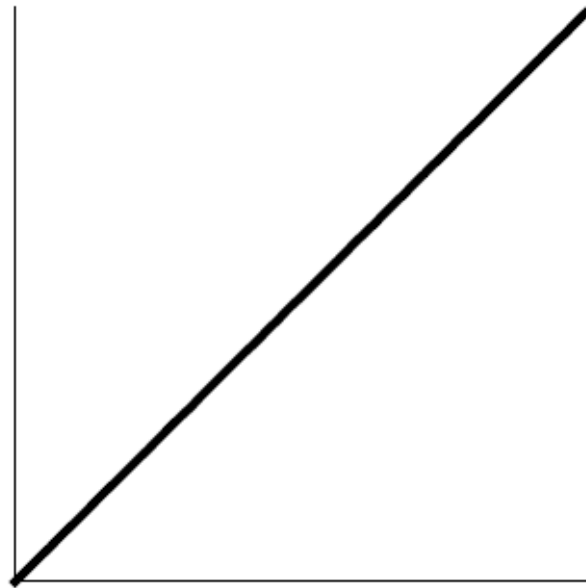
- **modello gaussiano.** Viene usato quando ci si trova di fronte ad un fenomeno continuo. Anch'esso raggiunge la soglia asintoticamente (Ciotoli, 2005);



**Gaussian Model**

**Figura 3.7 Modello gaussiano**

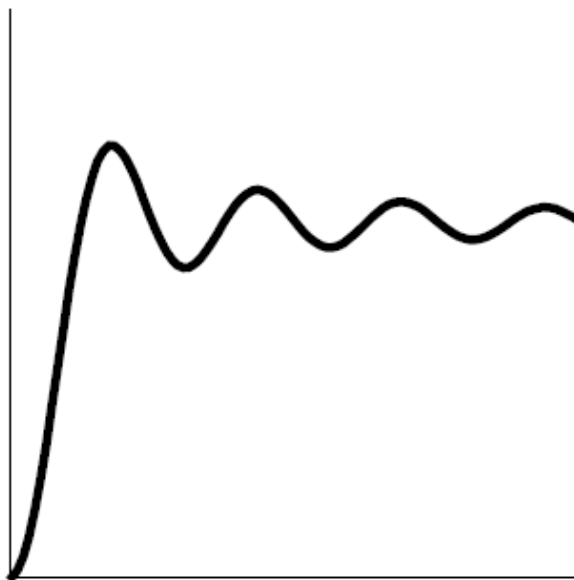
- **modello lineare**. Questo è il modello più semplice, per cui lo si cerca di usare il più possibile. Non raggiunge una soglia, ma aumenta linearmente all'aumentare della distanza (Ciotoli, 2005);



**Linear Model**

**Figura 3.8 Modello lineare**

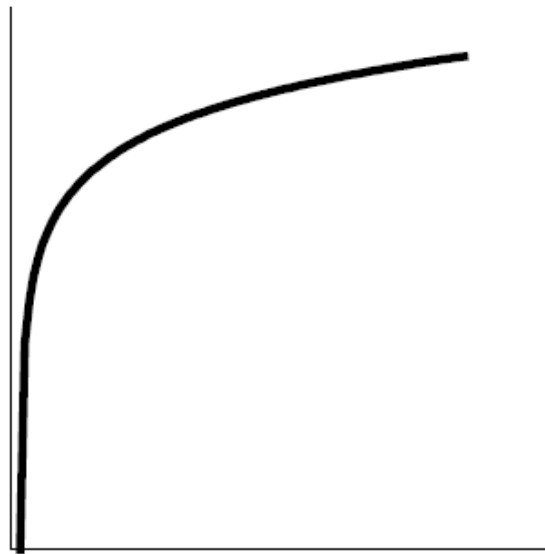
- **modello "hole effect"**. I variogrammi che rispondono a questo modello presentano una curva con una certa periodicità, risultato di una variabile le cui caratteristiche si ripetono nello spazio, oppure di un inadeguato numero di campioni (Mazzella, 2013);



**Wave (Hole Effect) Model**

**Figura 3.9 Modello "hole effect"**

- **modello logaritmico.** Tipico di situazioni in cui non esiste una zona di influenza. La funzione  $y(h)$  cresce al crescere di  $h$ .



### Logarithmic Model

Figura 3.10 Modello logaritmico

La figura seguente riporta un esempio di modellizzazione di un semivariogramma.

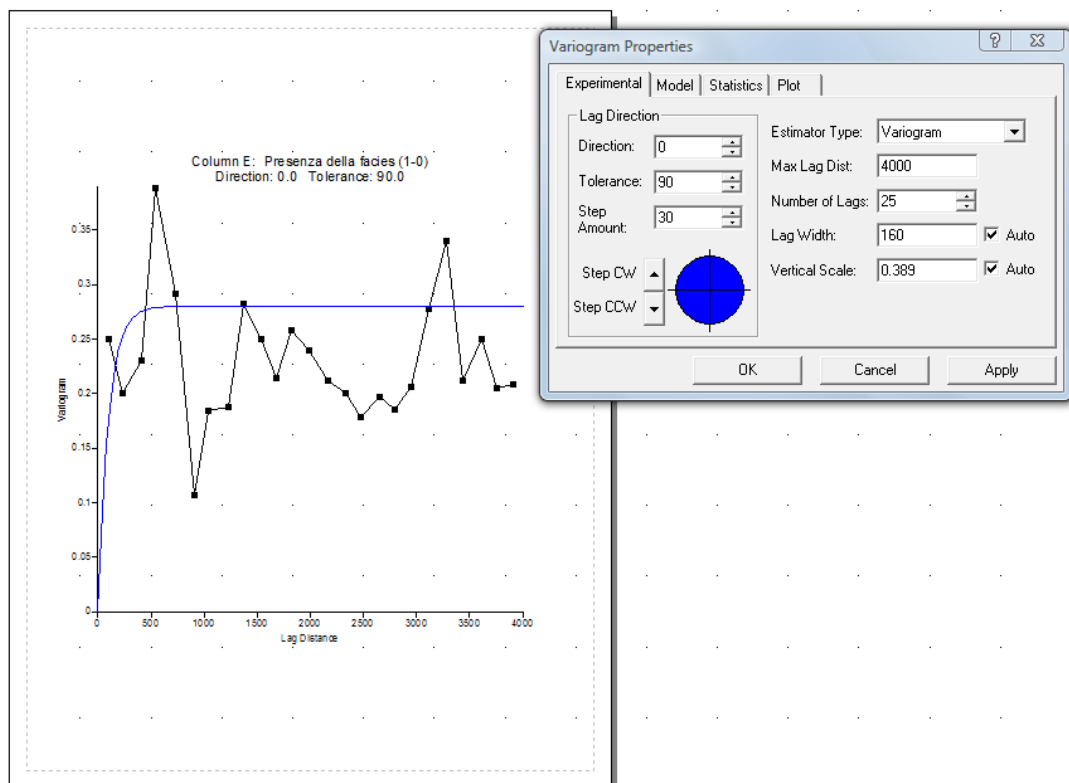


Figura 5.2 Esempio di modellizzazione di un semivariogramma sperimentale

### 3.3 Il Kriging

La maggior parte dei metodi statistici permette solo di avere una visione qualitativa dei fenomeni naturali; altri metodi possono essere utilizzati per avere risposte semiquantitative su fenomeni specifici. Il maggior contributo offerto dalla geostatistica, rispetto alla statistica classica, è stato quello di implementare tecniche opportune per studiare fenomeni naturali in cui bisogna tenere conto della dipendenza spaziale tra le osservazioni. La geostatistica offre, pertanto, una metodologia per descrivere la continuità spaziale che costituisce una caratteristica fondamentale di molti fenomeni naturali; inoltre fornisce degli adattamenti delle tecniche classiche di regressione lineare e non lineare utili allo studio ed all'elaborazione di mappe tematiche per una o più variabili spaziali, mediante i metodi di Kriging, inverso della distanza, vicinaggio, ecc. (Ciotoli, 2005).

Il Kriging è un metodo di interpolazione lineare che viene utilizzato nei processi di stima, operazione attraverso la quale viene attribuito in qualche modo un valore ad una variabile in un punto in cui essa non è nota. Il modo in cui viene calcolato tale valore definisce il tipo di stimatore. Tale operazione ha carattere locale, poiché la stima che si vuole effettuare non riguarda caratteristiche globali ma, appunto, locali. Per questo tipo di operazione si utilizzano generalmente gli stimatori lineari, nei quali il valore da attribuire in un punto  $x_0$  del campo viene calcolato mediante una combinazione lineare dei valori noti situati nelle vicinanze del punto da stimare (Raspa, 2004).

Esistono diversi tipi di Kriging, il più usato è l'Ordinary Kriging, che richiede però una particolare condizione, ossia la stazionarietà: la media e la varianza non devono variare nello spazio e nel tempo; in pratica la distribuzione del processo casuale non deve dipendere dalla posizione. Tuttavia spesso i dati non sono stazionari a causa della presenza di importanti trends, e si parla di condizione di non-stazionarietà o *drift*. In tal caso è necessario trovare una scala in cui il drift si annulla o diventa non importante (Noti, 2011).

Il Kriging stima i valori incogniti attraverso una media pesata dei punti misurati nel vicinato; i pesi da attribuire ai punti misurati dipendono non solo dalla distanza tra essi e il punto da predire ma anche dall'andamento dell'autocorrelazione spaziale definita dal variogramma. I pesi (coefficienti) sono scelti in modo tale da rendere minima la varianza dell'errore di stima; i 4 o 5 punti più vicini contribuiscono spesso per l'80% del peso totale, gli altri per la rimanente parte. Il raggio di ricerca è, in prima analisi, il valore del range (Noti, 2011).

Il Kriging fornisce non solo i valori previsti, ma anche le corrispondenti varianze che esprimono l'affidabilità della previsione.

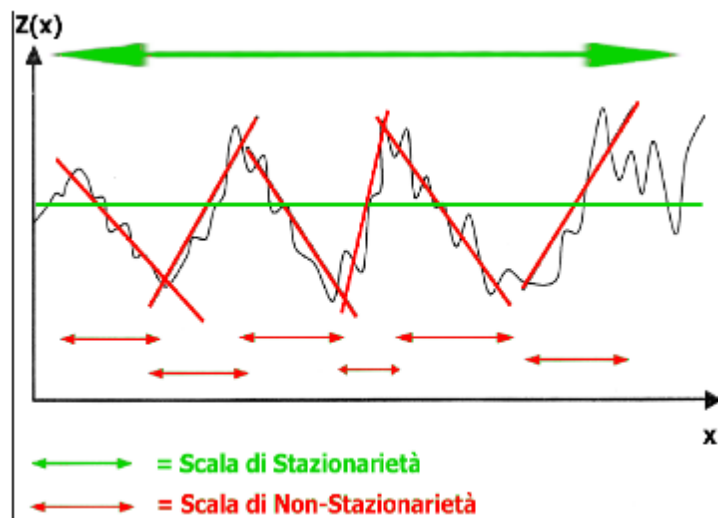


Figura 3.3 Condizioni stazionarie e non stazionarie (Noti, 2011)

### 3.4 La *cross-validation*

E' utile saggiare la bontà di un modello, per confrontarlo con altri e scegliere quello che si adatta in modo migliore al fenomeno che si studia. In geostatistica si usa spesso la *cross-validation*, che permette di confrontare i valori previsti con i valori veri, usando solo l'informazione che si ricava dall'insieme dei dati osservati. Per ogni sito di misurazione, il valore viene temporaneamente eliminato e viene previsto come se fosse ignoto, utilizzando gli altri valori campionati. Queste previsioni si possono quindi confrontare con i valori veri, calcolando i residui tra valori osservati e valori previsti (Lorenzetto, 2003).

Nello specifico, per la trattazione geostatistica dei dati è stato usato il software Surfer 8, che usa un tipo di *cross-validation* noto come *leave one out*, nel quale si procede a calcolare la stima con un determinato algoritmo di interpolazione eliminando di volta in volta una sola delle informazioni disponibili. Al termine di ciascuna interpolazione viene calcolato un errore (residuo):

$$\text{Errore} = \hat{Z}_i - Z_i$$

dove  $\hat{Z}_i$  e  $Z_i$  sono rispettivamente il valore calcolato e misurato nell' *i-esimo* punto.

I risultati della *cross-validation* possono essere confrontati visivamente attraverso la funzione *post map* nella modalità *plot* di Surfer. La scelta del migliore risultato va fatta, oltre che attraverso un approccio qualitativo, confrontando i parametri statistici dei differenti data-set di residui.

### 3.5 Applicazioni

La geostatistica è stata utilizzata prevalentemente per lo studio del campo di moto dell'acquifero superficiale e per l'analisi delle stratigrafie. Infatti durante il dottorato è stato fatto uno stage di tre mesi presso il Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie di Strasburgo, dove sono state analizzate le stratigrafie e si è cercato di uniformarle, per quanto possibile, riducendole allo stesso numero di strati (sette), e associando poi ogni strato ad una delle cinque classi di permeabilità considerate (molto permeabile, permeabile, semipermeabile, poco permeabile, impermeabile). Questi dati sono stati trattati con la tecnica di interpolazione geostatistica dell'Indicator Kriging (IK), che consente di valutare gli effetti di variabilità spaziale dei valori medi dei campi considerati su regioni non collegate spazialmente; essa permette di lavorare con fenomeni ad alta variabilità senza eliminare gli *outliers*, che spesso sono i valori più importanti, e inoltre permette di ottenere stime attendibili della variabile in esame. Nella pratica, l'applicazione del metodo è consistita nel considerare per ognuno dei 7 strati la presenza o meno di ciascuna facies; questa caratteristica è stata tradotta in variabili categoriche indicate con i numeri 0 (assenza della facies) ed 1 (presenza della facies), così, ad esempio, la facies "molto permeabile" è presente nel primo strato della terza stratigrafia, a cui pertanto viene assegnato il valore 1, mentre è assente nel primo strato della prima stratigrafia, che pertanto avrà valore 0, e così via.

## **Capitolo 4**

### **Dinamica dell'acquifero superficiale**

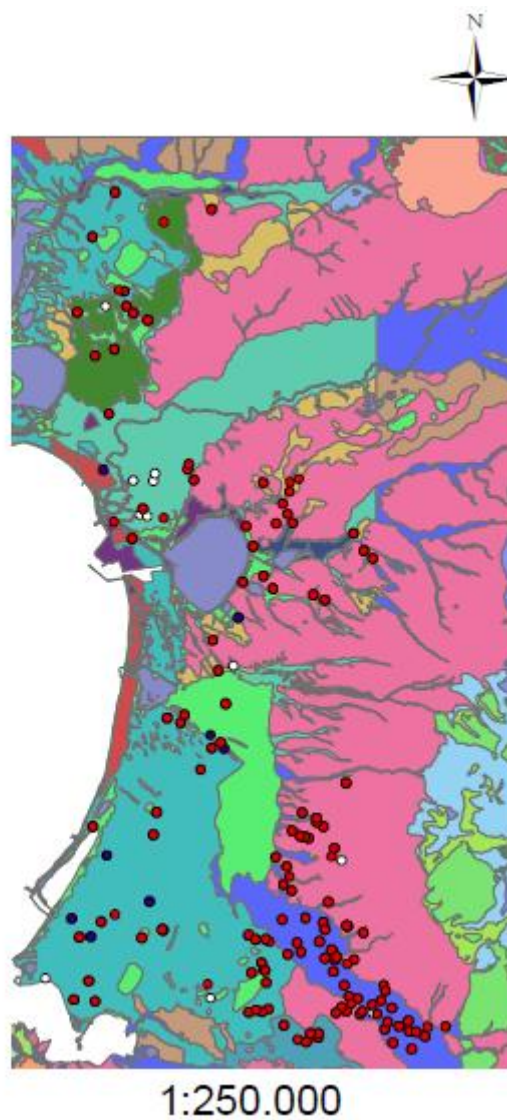
#### **4.1 Reperimento ed elaborazione dei dati**

Lo studio dell'idrodinamica dell'acquifero si è basato su una serie di dati raccolti fra la fine dell'inverno e la primavera del 2003. In particolare, attraverso il confronto di diversi scenari, si è cercato di individuare: le direzioni di flusso, i punti di recapito e di alimentazione dell'acquifero superficiale e la variazione della superficie piezometrica.

Le campagne condotte nel 2003 si spingono a Sud sino all'abitato di Uras, utilizzando come limite meridionale il corso del Rio Mogoro, in modo da comprendere tutta la zona intorno ad Arborea, Terralba e Marrubiu, dove un intenso sfruttamento della falda, per l'irrigazione e per l'allevamento, ha innescato processi di vulnerazione dell'acquifero sotterraneo, dovuti essenzialmente all'intrusione salina (Soddu S., 2004) . Il limite Nord si spinge oltre lo stagno di Santa Giusta, il limite Est è rappresentato dai depositi pleistocenici dell'area continentale, alle pendici del Monte Arci. Attraverso il software ArcGIS10 è stato possibile rappresentare nell'area di studio la distribuzione dei punti di misura, divisi per colore a seconda del periodo dell'anno in cui sono state effettuate le campagne (figura 4.1).

I punti sono 133 per la campagna di fine inverno-inizio primavera del 2003, 134 per la primavera del 2003 e 141 per il periodo marzo-giugno 2003.

I dati ricavati sono stati implementati nel software Surfer8, che attraverso una trattazione geostatistica consente di ottenere delle mappe ad isolinee, nel caso specifico delle idroisopse. Per prima cosa sono stati inseriti i dati, le coordinate Roma 40 Nord ed Est e le quote piezometriche; su questa base è stato realizzato il semivariogramma, e successivamente modellizzato agendo su parametri quali la tolleranza angolare, la direzione e il numero di lags, ed adattando i modelli del software al semivariogramma sperimentale. Poi si è proceduto con l'interpolazione attraverso il Kriging a punti, e si è arrivati ad ottenere una mappa ad isopiezometriche, la cui validità è stata verificata con il processo della cross-validation. Di seguito sono riportati i risultati di ogni singola campagna.



**Figura 4.1** Carta geologica dell'area di studio con l'ubicazione dei punti di misura relativi alle tre campagne condotte nel 2003.

**Pallini bianchi:** campagna fine inverno-inizio primavera 2003

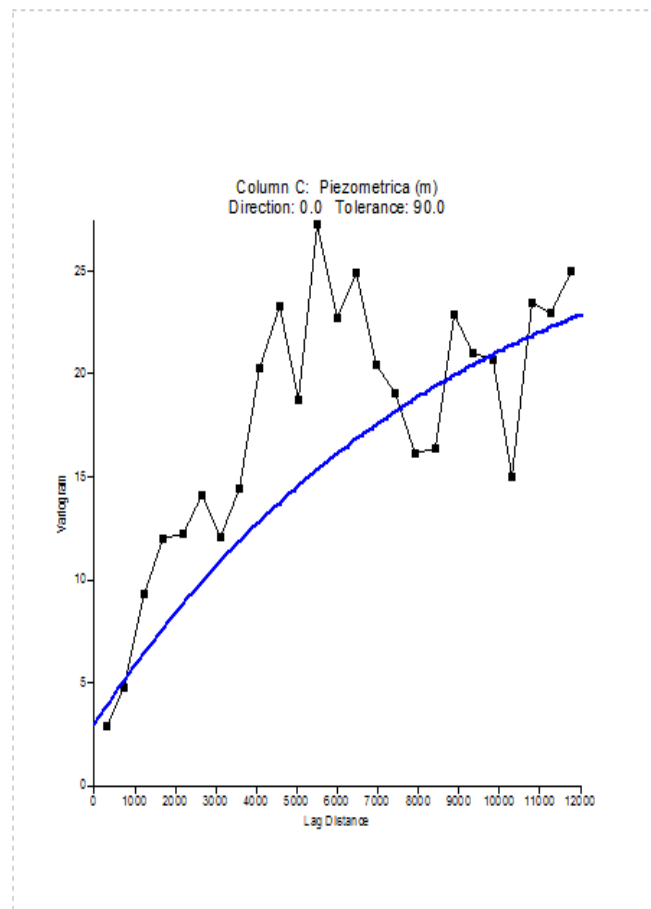
**Pallini blu:** campagna primavera 2003

**Pallini rossi:** campagna marzo-giugno 2003



#### 4.1.1 Campagna fine inverno-inizio primavera 2003

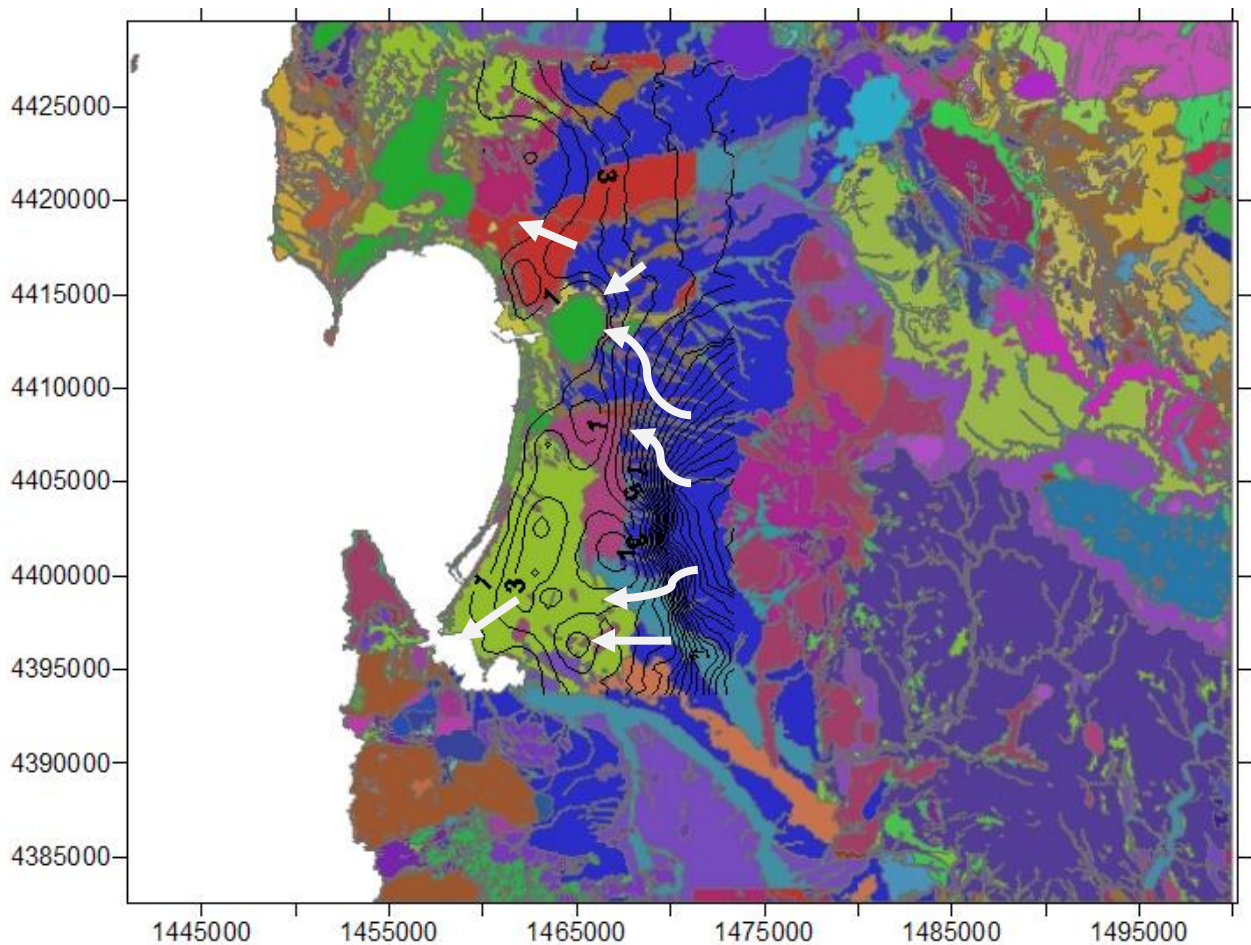
Dopo avere inserito i dati, si è ottenuto il seguente semivariogramma.



**Figura 4.2 Semivariogramma**

Il semivariogramma sperimentale è stato modellizzato con il modello esponenziale, ed un nugget effect pari a 3; la tolleranza angolare è di 90°, la direzione 0° e il numero di lags è 25.

Poi con il metodo del Kriging a punti è stata fatta l'interpolazione, che ha portato alla seguente mappa:



**Figura 4.3 Campo di moto dell'acquifero freatico (fine inverno-inizio primavera 2003)**

La figura 4.3 mostra come le piezometriche assumano una configurazione piuttosto regolare che segue l'andamento altimetrico della zona, presentano un gradiente omogeneo ed evidenziano un flusso diretto verso le coste e gli stagni, con qualche locale inversione dovuta alla presenza di pozzi in fase di pompaggio, caratterizzati dalle tipiche linee chiuse a valori decrescenti verso il pozzo. L'ex Stagno di Sassu costituisce un limite impermeabile per l'acquifero, infatti le isopieze tendono a disporsi perpendicolarmente ad esso.

Per quanto riguarda la cross-validation, ricordiamo che calcola l'errore come differenza:

$$\text{Errore} = \hat{Z}_i - Z_i$$

dove  $\hat{Z}_i$  e  $Z_i$  sono rispettivamente il valore calcolato e misurato nell' *i-esimo* punto.

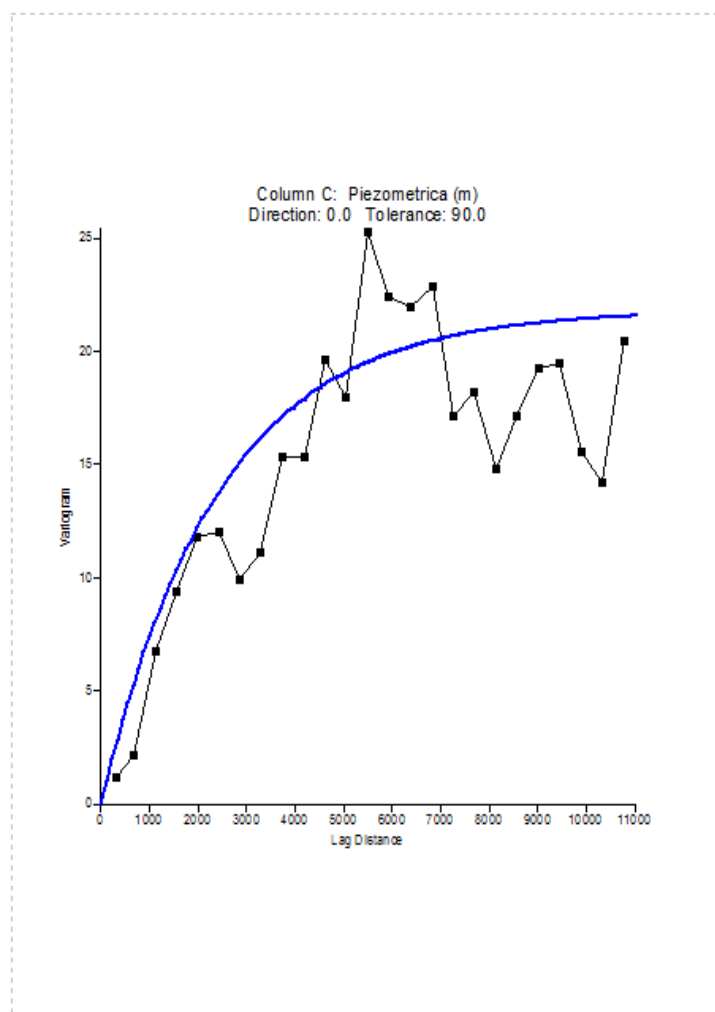
Nel presente studio è stato considerato il residuo della media ( $R_m$ ):

$$R_m = 5,108345864 - 5,021553031 = -0,086792833 = -0,09$$

Si tratta di un valore abbastanza basso, che fa ritenere attendibile il processo di interpolazione.

#### 4.1.2 Campagna primavera 2003

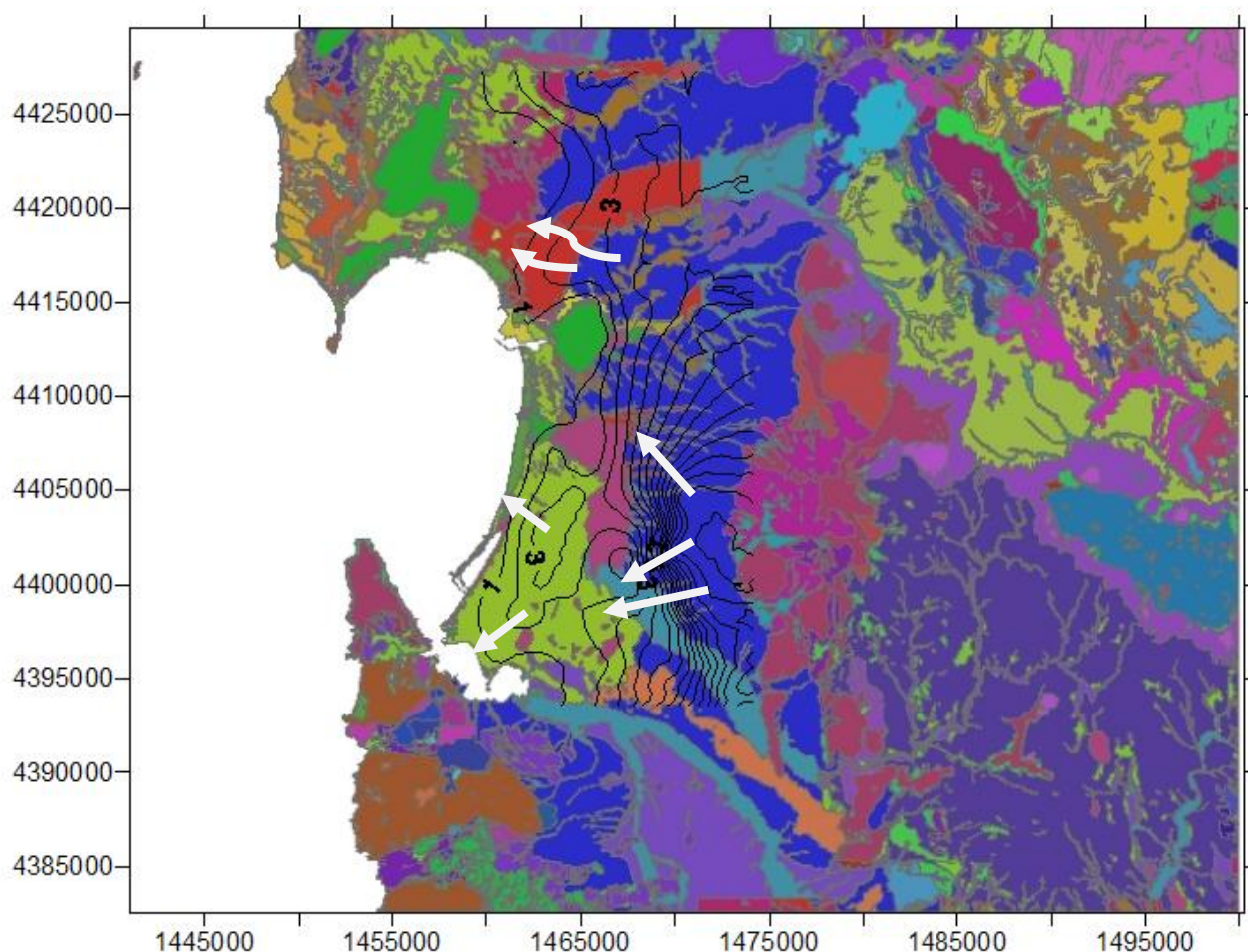
Il semivariogramma ottenuto dai dati a disposizione è riportato nella figura 4.4:



**Figura 4.4 Semivariogramma**

Anche questo variogramma è stato modellizzato con l'esponenziale, e un nugget effect pari a 0; la tolleranza angolare è di 90°, la direzione 0° e il numero di lags è 25.

Il processo di interpolazione del Kriging ha portato alla seguente mappa:



**Figura 4.5 Campo di moto dell'acquifero freatico (primavera 2003)**

Dal lavoro svolto nella primavera del 2003 (Fig.4.5) risulta che la superficie piezometrica ha andamento crescente dalla costa verso l'interno, in particolare presenta un asse di depressione in direzione Nord-Sud, ad Est di Arborea e di Sassu, che si può interpretare considerando che, in questa zona, l'acquifero è molto sfruttato, lungo la costa invece viene utilizzato maggiormente l'acquifero profondo, per cui in questa parte del territorio potrebbe avvenire la sua ricarica. Verso Nord-Est il fiume Tirso rappresenta un punto di recapito di notevole richiamo per le acque sotterranee; qui le idroisoipse risultano infatti quasi allineate con il corso d'acqua, mentre le linee di flusso confluiscono quasi perpendicolarmente ad esso: ciò significa che il fiume svolge un'azione di drenaggio nei confronti dell'acquifero.

I corsi d'acqua che nascono dal Monte Arci, a Sud-Est della zona di studio, sono invece alimentatori della falda freatica. La forma e l'andamento della rete di flusso a partire dal Monte Arci fino alla piana di Arborea è tale che l'interasse delle piezometriche sia crescente con concavità a monte, e ciò conferma l'ipotesi di alimentazione dell'acquifero

superficiale da parte dei corsi d'acqua prima citati, che si traduce quindi anche nella presenza di una serie di spartiacque sotterranei.

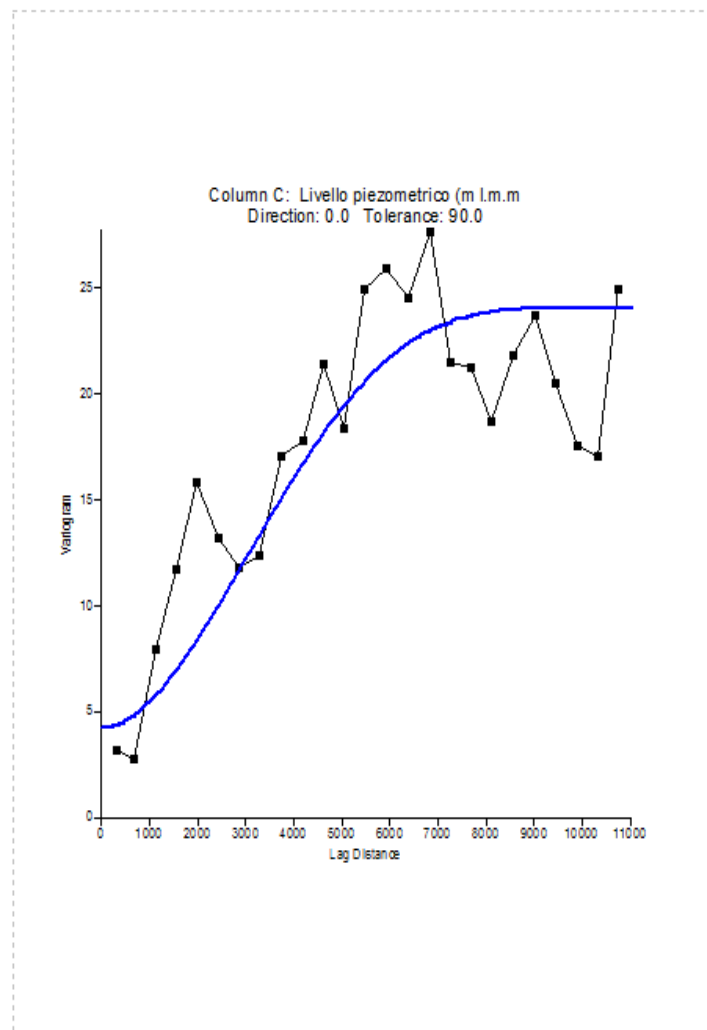
La cross-validation in questo secondo caso ha dato il seguente risultato:

$$R_m = 4,7924626865 - 4,7181543641 = 0,0743083224 = 0,074$$

Anche qui l'interpolazione si può ritenere buona.

#### 4.1.3 Campagna marzo-giugno 2003

Relativamente alla campagna condotta tra marzo e aprile del 2003 si è ottenuto il seguente variogramma:

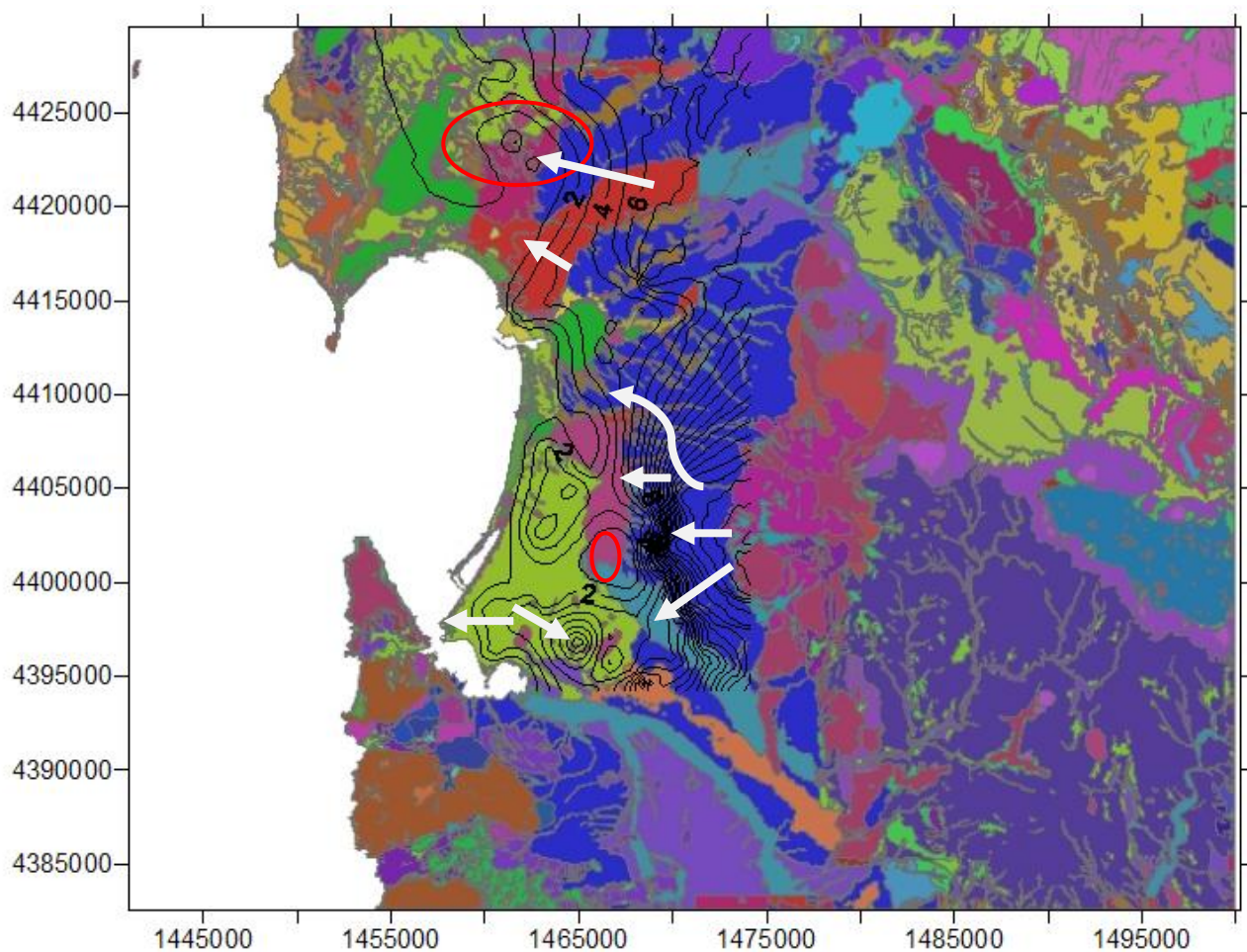


**Figura 4.6 Semivariogramma**

Per questo variogramma è stato utilizzato il modello cubico, ed un nugget effect pari a 4.25; la tolleranza angolare è di 90°, la direzione 0° e il numero di lags è 25.

Il processo di interpolazione del Kriging ha portato alla seguente mappa:





**Figura 4.7 Campo di moto dell'acquifero freatico (marzo-giugno 2003)**

Dallo studio effettuato tra marzo e giugno 2003 (Fig.4.7) si evince che il livello della falda, per gran parte dell'area in studio, è prossimo al livello medio del mare. Per trovare l'idroisoipsa di 5 m sul l.m.m. bisogna spingersi verso l'interno, ad oltre 5 km dalla costa; ciò è dovuto sia alla morfologia della zona, di costa bassa e pianeggiante, dotata di un limitato gradiente topografico, sia ad un impoverimento della falda causato da un'eduzione superiore alla potenzialità dell'acquifero. Una grossa zona in depressione è presente ad Est dello stagno di Cabras e ad Est della bonifica di Arborea (ellissi rosse): nel primo caso si spiega considerando che tutta l'area ha una quota del piano campagna prossima al livello medio del mare, con alcune aree, zone paludose ora bonificate, persino in depressione, sino a 4 m sotto il l.m.m.; nel secondo caso la depressione è dovuta probabilmente alla presenza di pozzi in fase di pompaggio. Inoltre si nota un consistente gradiente della piezometria ai margini sud orientali della zona, dovuto sia al forte gradiente topografico, sia alla presenza, sul letto dell'acquifero semiconfinato, di formazioni

basaltiche e trachitiche del complesso vulcanico del Monte Arci, che essendo impermeabili costringono la falda superficiale verso l'alto. Il livello medio della falda, relativo a tutta l'area di studio, è di poco superiore ai 4 m sul l.m.m.

Il risultato della cross-validation è il seguente:

$$R_m = 5,1514893617 - 5,1121249125 = 0,0393644492 = 0,04$$

Come nei casi precedenti l'interpolazione si può ritenere accettabile.

## 4.2 Conclusioni

Alla luce di questi studi si possono fare alcune considerazioni:

- la superficie piezometrica indica un asse di drenaggio principale da Est verso Ovest, in corrispondenza del mare e della peschiera di Corru s'Ittiri;
- gli stagni di Cabras, Santa Giusta, S'Ena Arrubia, San Giovanni e Marceddì rappresentano altri corpi recettori;
- le acque del settore centro-orientale defluiscono naturalmente verso l'ex Stagno di Sassu (- 2 m. s.l.m.m.) dove, a contatto con le argille impermeabili che ricoprono l'area stagnale, generano locali emergenze;
- i limiti Nord e Sud dell'area di studio sono rispettivamente il Tirso ed il rio Mogoro, ed entrambi drenano l'acquifero;
- nella porzione centro-orientale i corsi d'acqua che nascono dal Monte Arci sono drenati dall'acquifero.

La definizione dei limiti idrostrutturali dell'acquifero superficiale non può esaurirsi con lo studio della dinamica, che rappresenta un valido punto di partenza ma necessita di un approfondimento di tipo geologico, e come si vedrà nei prossimi capitoli ciò è stato realizzato attraverso l'interpretazione di stratigrafie e di SEV, e l'analisi dei progetti relativi alla realizzazione dei canali che attraversano l'area di studio.

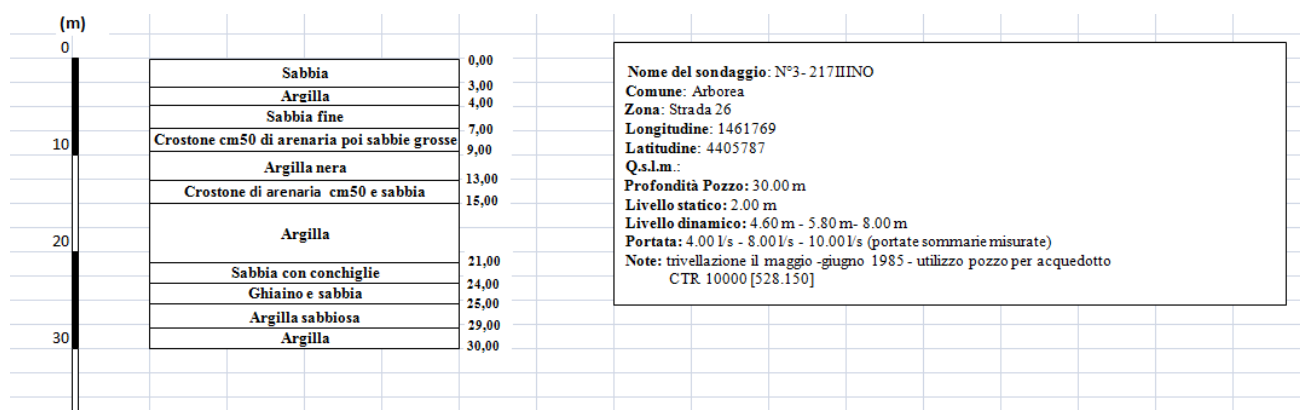
## Capitolo 5

### Analisi delle stratigrafie

#### 5.1 Reperimento delle stratigrafie

Si dispone di 124 stratigrafie, variamente distribuite nell'area di studio. L'agenzia Laore Sardegna ne ha fornito 75; altre sono state reperite in alcune tesi di dottorato (Salis, 2005; Soddu, 2004) e provengono dal Genio Civile di Oristano (8) e dalla ICOS (11), e in una tesi di laurea (Staffa, 2003), queste ultime sono state fornite dalla Progemisa e sono 30.

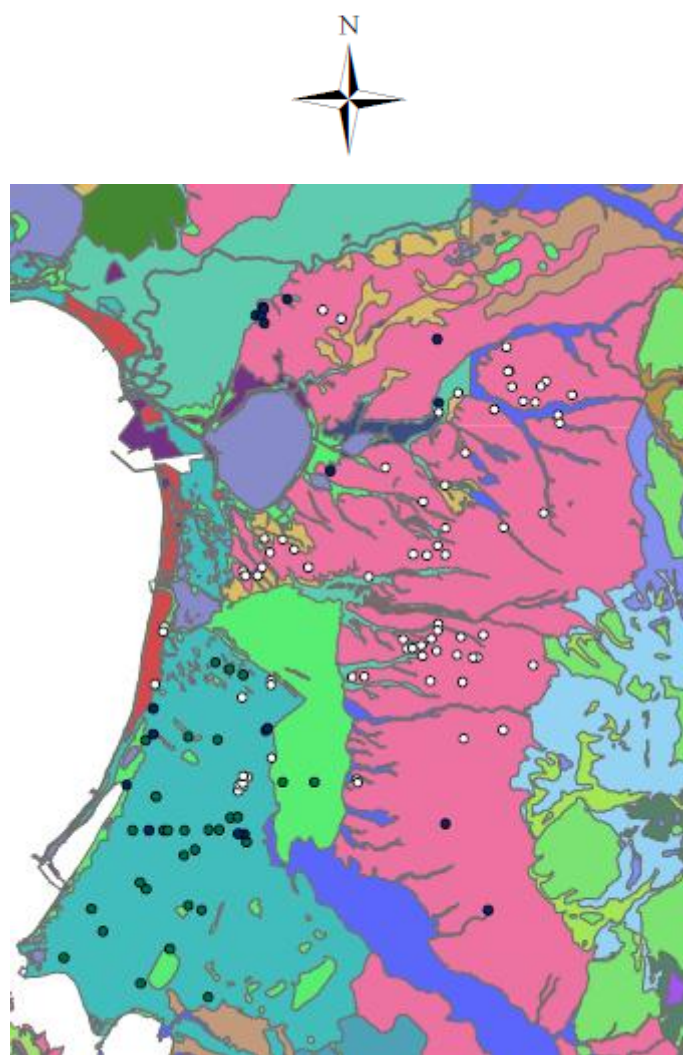
Le informazioni sono state informatizzate su fogli di calcolo Excel, di seguito si riporta un esempio:



**Figura 5.1 Esempio di stratigrafia**

E' stato creato un database con le coordinate dei punti in cui sono stati fatti i carotaggi ed importato nel software ArcGIS 10, in modo tale da avere la distribuzione delle informazioni nello spazio, come mostra la figura 5.2.























1:200.000

**Figura 5.2 Stratigrafie distribuite nell'area di studio. I colori indicano le fonti (bianco: Laore Sardegna; verde:Progemisa; blu: Genio Civile Or e ICOS). La legenda nella pagina seguente.**

## Legend

### TIPOUNIT 1

-  Depositi alluvionali terrazzati. Ghiaie con subordinate sabbie. OLOCENE
-  Depositi alluvionali terrazzati. OLOCENE
-  Depositi alluvionali terrazzati. Sabbie con subordinati limi ed argille. OLOCENE
-  Depositi alluvionali. Ghiaie da grossolane a medie. OLOCENE
-  Depositi alluvionali. Limi ed argille. OLOCENE
-  Depositi alluvionali. OLOCENE
-  Depositi alluvionali. Sabbie con subordinati limi e argille. OLOCENE
-  Depositi di spiaggia antichi. Sabbie, arenarie, calcinuditi, ghiaie con bivalvi, gasteropodi, con subordinati depositi sabbioso-limosi e calcinuditi di stagno costiero. Spessore: fino a 3-4 m. ?PLEISTOCENE SUP. -
-  Depositi di spiaggia. Sabbie e ghiaie, talvolta con molluschi, etc. OLOCENE
-  Depositi di versante. Detriti con clasti angolosi, talora parzialmente cementati. OLOCENE
-  Depositi eolici. Sabbie di duna ben classate. OLOCENE
-  Depositi lacustri, palustri. Argille molto plastiche, localmente ricche di materia organica, talvolta con sottili intercalazioni di sabbie contenenti gusci di bivalvi (Cerastoderma edule), di gasteropodi polmonati (Hy
-  Depositi lacustri, palustri. Limi ed argille grigio scure con intercalazioni sabbiose. OLOCENE
-  Depositi lacustri. Calcani lacustri talvolta con gasteropodi polmonati. OLOCENE
-  Depositi palustri. Limi ed argille limose talvolta ciottolose, fanghi torbosi con frammenti di molluschi. OLOCENE
-  Laghi
-  Litofacies nel Subsistema di Portoscuso (SISTEMA DI PORTOVESME). Ghiaie alluvionali terrazzate da medie a grossolane, con subordinate sabbie. PLEISTOCENE SUP.
-  Litofacies nel Subsistema di Portoscuso (SISTEMA DI PORTOVESME). Sabbie e arenarie eoliche con subordinati detriti e depositi alluvionali. PLEISTOCENE SUP.

## 5.2 Analisi ed interpretazione dei dati con il metodo dell'Indicator Kriging

Uno studio approfondito delle stratigrafie relative alla Bonifica di Arborea è stato fatto presso il Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie di Strasburgo. Secondo la Carta Geologica d'Italia dell'IGM 1:100.000 nell'area sono presenti sabbie dunari più o meno cementate, a resti di Cervidi, in massima parte wurmiane (Pleistocene).

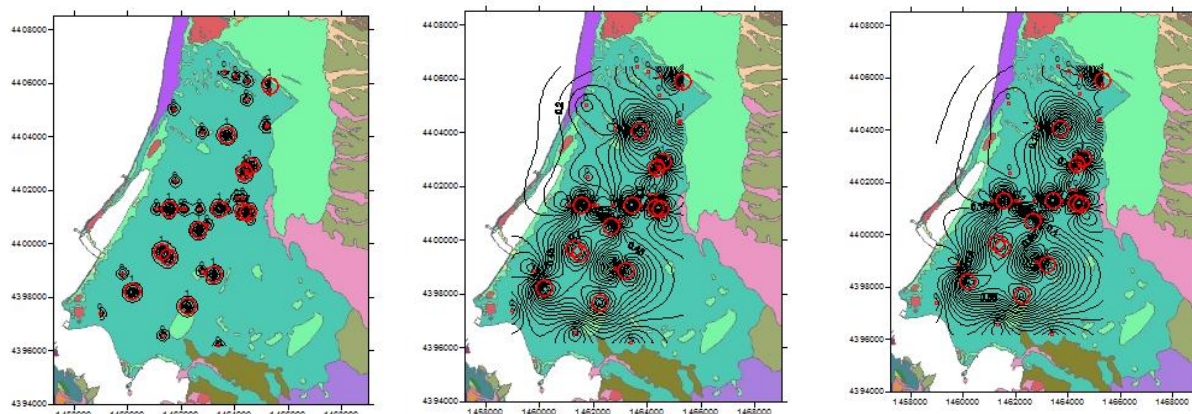
In questa zona sono ubicate 40 delle 124 stratigrafie distribuite sull'intera area di studio. Esse sono state uniformate allo stesso numero di strati (7), e poi suddivise in 5 facies (classi di permeabilità):

- 1- Molto permeabile (ghiaia)
- 2- Permeabile (sabbia grossa)
- 3- Semi-permeabile (sabbia media)
- 4- Poco permeabile (sabbia fine, argilla sabbiosa, sabbia argillosa)
- 5- Impermeabile (limo, argilla).

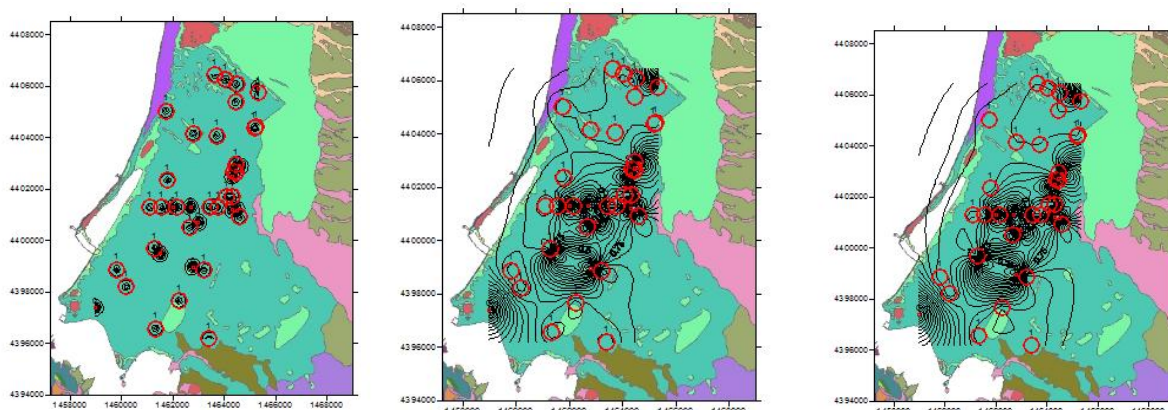
Tali dati sono poi stati trattati con la tecnica di interpolazione geostatistica dell'Indicator Kriging; l'applicazione del metodo è consistita nel considerare per ognuno dei 7 strati la presenza o meno di ciascuna facies; questa caratteristica è stata tradotta in variabili categoriche indicate con i numeri 0 (assenza della facies) ed 1 (presenza della facies), così, ad esempio, la facies "molto permeabile" è presente nel primo strato della terza stratigrafia, a cui pertanto viene assegnato il valore 1, mentre è assente nel primo strato della prima stratigrafia, che pertanto avrà valore 0, e così via.

Lo studio geostatistico è stato poi affrontato con l'ausilio del software Surfer8. I parametri considerati per la creazione del variogramma sono le coordinate latitudine Nord-longitudine Est di ciascun pozzo e la variabile categorica presenza o assenza di facies (1-0). Ogni variogramma è stato poi modellizzato con il modello esponenziale, e per ciascuno di essi sono state considerate tre diverse distanze di correlazione o "lenght" (100, 800 e 1500). La lenght è il parametro che esprime quanto rapidamente le componenti del variogramma cambiano all'aumentare della distanza di correlazione: più ampia è tale distanza, più punti sono inclusi nel processo di interpolazione.

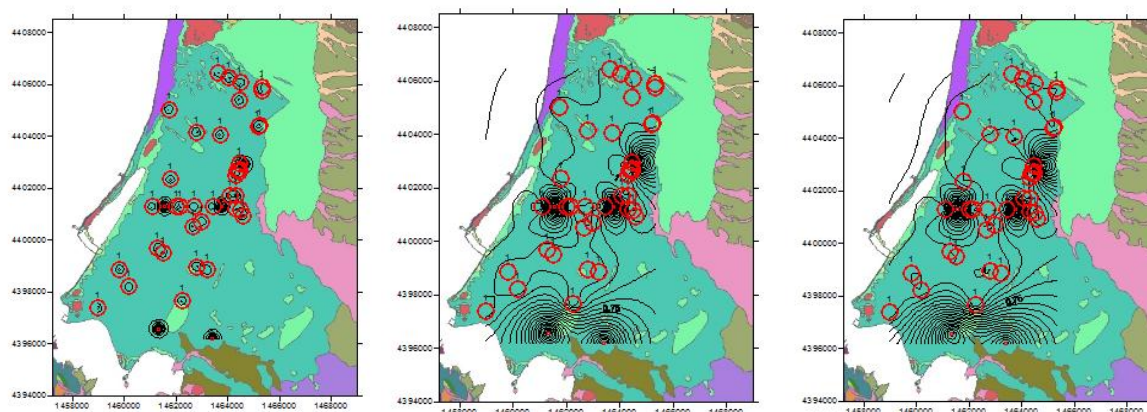
Dopo aver ottenuto i variogrammi (3 per ogni classe di permeabilità, quindi 15) si è effettuato il processo di interpolazione di Kriging e poi si sono create le mappe, una per ogni lenght per ogni classe di permeabilità, quindi ancora 15.



**Figura 5.3 Carte di permeabilità per la classe 1 (molto permeabile, ghiaia) alle distanze di correlazione, da sinistra verso destra, 100, 800 e 1500**

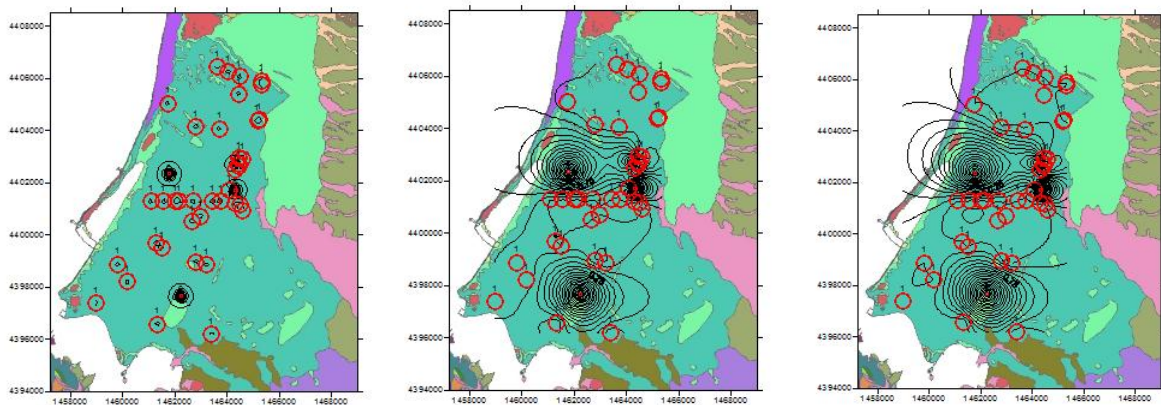


**Figura 5.4 Carte di permeabilità per la classe 2 (permeabile, sabbia grossa) alle distanze di correlazione, da sinistra verso destra, 100, 800 e 1500**

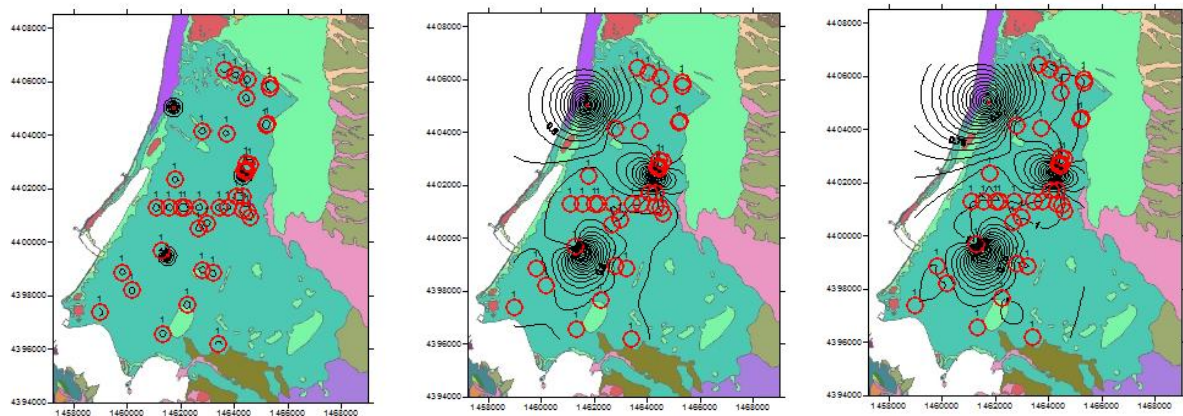


**Figura 5.5 Carte di permeabilità per la classe 3 (semipermeabile, sabbia media) alle distanze di correlazione, da sinistra verso destra, 100, 800 e 1500**





**Figura 5.6 Carte di permeabilità per la classe 4 (poco permeabile, sabbia fine, argilla sabbiosa e sabbia argillosa) alle distanze di correlazione, da sinistra verso destra, 100, 800 e 1500**



**Figura 5.7 Carte di permeabilità per la classe 5 (impermeabile, limo e argilla) alle distanze di correlazione, da sinistra verso destra, 100, 800 e 1500**

Come si vede dalle mappe, all'aumentare della length le isolinee si infittiscono, perchè il processo di interpolazione comprende sempre più punti; i cerchi rossi grandi indicano la presenza della classe di permeabilità (1), quelli piccoli l'assenza (0). Si osserva che la più presente è la classe 3, corrispondente alla sabbia media (semipermeabile), che caratterizza maggiormente l'area della Bonifica di Arborea; segue la classe 2 (sabbia grossa, permeabile). Le zone impermeabili sono presenti soprattutto vicino agli stagni, infatti qui dominano l'argilla ed il limo.

Questo approccio allo studio delle stratigrafie non si è rivelato troppo efficace, in quanto:

- ha richiesto una serie di semplificazioni, come ad esempio includere sabbia fine, argilla sabbiosa e sabbia argillosa nella stessa classe di permeabilità (poco permeabile). Tale

assunzione si potrebbe fare se si conoscesse il grado di compattazione e l'esatta granulometria delle litologie in esame, ma dalle stratigrafie non è emerso nulla a riguardo;

- ogni stratigrafia si compone di 7 strati, e la presenza o assenza di una data classe di permeabilità viene valutata una sola volta, ossia: se in una data stratigrafia l'argilla è presente tre volte, alternata ad altre litologie, nel database viene considerata una sola volta, perché così richiede l'applicazione del metodo; in questo modo, ovviamente, si ha una grande perdita di informazione;

- il valore 1-0, rappresentato con cerchi di diametro decrescente sulle mappe delle figure precedenti, non tiene conto degli effettivi strati ma solo di quelli più significativi in termini di spessore, e anche in questo caso viene persa dell'informazione.

Si può quindi concludere che il metodo dell'Indicator Kriging per dati come quelli in esame dovrebbe essere applicato apportando delle modifiche che tengano conto di quanto osservato.

### **5.3 Analisi dettagliata delle stratigrafie**

Alla luce di quanto emerso, si è pensato di analizzare le stratigrafie con un altro tipo di approccio, ossia valutandole una per una e cercando di individuare il letto della falda superficiale, identificandolo con il primo strato di materiale impermeabile di spessore importante. La permeabilità di una roccia è legata alla dimensione dei granuli che la costituiscono, al grado di compattazione ed all'intercomunicabilità dei pori.

Le informazioni desumibili dalle stratigrafie hanno permesso di concludere che nell'area in esame sono presenti fondamentalmente sabbia, ghiaia ed argilla, e quest'ultima è stata considerata il letto dell'acquifero freatico.

SCALA GRANULOMETRICA					
MILLIMETRI	MICRON	SCALA $\phi$	CLASSI GRANULOMETRICHE (Wentworth)		
4096		- 12	Blocchi	GHIAIA	
256		- 8	Ciottoli		
64		- 6	Ciottoletti		
4.00		- 2	Granuli		
3.36		- 1.75			
2.83		- 1.50			
2.38		- 1.25			
2.00	2000	- 1	Sabbia molto grossa	SABBIA	
1.68		- 0.75			
1.41		- 0.50			
2.19		- 0.25	Sabbia grossa		
1.00	1000	0			
0.84		0.25	Sabbia media		
0.71		0.50			
0.59		0.75	Sabbia fine		
0.50	500	1			
0.42	420	1.25	Sabbia molto fine		
0.35	350	1.50			
0.30	300	1.75	Silt grosso	SILT (limo)	
0.25	250	2			
0.210	210	2.25	Silt medio		
0.177	177	2.50			
0.149	149	2.75	Silt fine		
0.125	125	3			
0.105	105	3.25	Silt molto fine		
0.088	88	3.50			
0.074	74	3.75	ARGILLA	FANGO	
0.0625	62.5	4			
0.053	53	4.25	Silt grosso		
0.044	44	4.50			
0.037	37	4.75	Silt medio		
0.031	31	5			
0.0156	15.6	6	Silt fine		
0.0078	7.8	7			
0.0039	3.9	8	Silt molto fine		
0.0020	2	9			
0.00098	0.98	10	ARGILLA		
0.00049	0.49	11			
0.00024	0.24	12			

Tabella 5.1. Classificazione granulometrica delle rocce (da:  
[www.geo.uniba.it/attachments/article/.../Classif%20Rocce%20Sedim.pdf](http://www.geo.uniba.it/attachments/article/.../Classif%20Rocce%20Sedim.pdf))

Conducibilità idraulica (m/s)	10 <sup>1</sup>	10 <sup>0</sup>	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-9</sup>	10 <sup>-10</sup>	10 <sup>-11</sup>
Granulometria omogenea	ghiaia pura			sabbia		sabbia fine			limo		argilla		
Granulometria eterogenea	ghiaia	ghiaia e sabbia			sabbia con limo e argilla						argilla		
Grado di permeabilità assoluta	molto buono			buono		scarso					nullo		
Complessi idrogeologici	altamente permeabile			mediamente permeabile		scarsamente permeabile					impermeabile		

Tabella 5.2. Permeabilità delle rocce (da: Civita, 2001)

L'intera area di studio è stata suddivisa in tre zone a seconda della geologia, nello specifico:

- zona 1 - Depositi di spiaggia antichi. Sabbie, arenarie, calciruditi, ghiaie con bivalvi, gasteropodi, con subordinati depositi sabbioso-limosi e calcilutiti di stagno costiero. Spessore fino a 3-4 m. Pleistocene Sup.-Olocene;
- zona 2 - Litofacies nel subsistema di Portoscuso (Sintema di Portovesme). Ghiaie alluvionali terrazzate da medie a grossolane, con subordinate sabbie. Pleistocene Sup. ;
- zona centrale - Depositi palustri. Limi ed argille limose talvolta ciottolose, fanghi torbosi con frammenti di molluschi. Olocene.

Per ciascuna zona sono state considerate delle linee lungo le quali sono distribuite le stratigrafie, come mostra la figura 5.8.

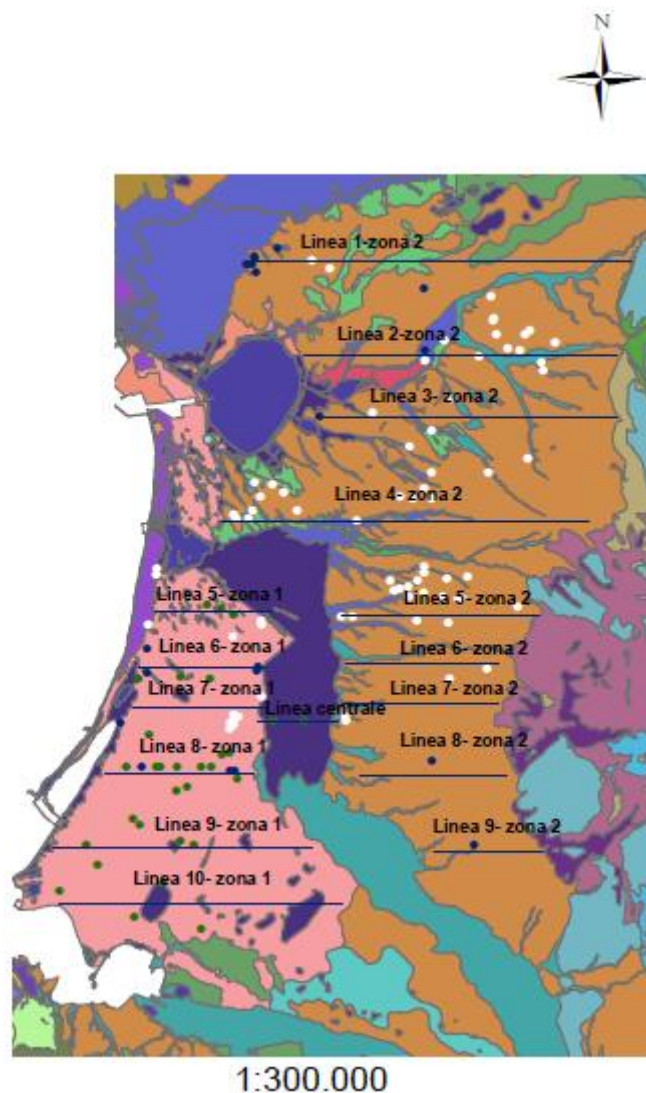



















Figura 5.10. Linee lungo le quali sono distribuite le stratigrafie; i colori indicano le fonti (bianco: Laore Sardegna; verde: Progemisa; blu: Genio Civile Or e ICOS). La legenda nella pagina seguente.



## Legenda

### TIPOUNIT\_1

	Depositi alluvionali terrazzati. Ghiaie con subordinate sabbie. OLOCENE
	Depositi alluvionali terrazzati. OLOCENE
	Depositi alluvionali terrazzati. Sabbie con subordinati limi ed argille. OLOCENE
	Depositi alluvionali. Ghiaie da grossolane a medie. OLOCENE
	Depositi alluvionali. Limi ed argille. OLOCENE
	Depositi alluvionali. OLOCENE
	Depositi alluvionali. Sabbie con subordinati limi e argille. OLOCENE
	Depositi di spiaggia antichi. Sabbie, arenarie, calciruditi, ghiaie con bivalvi, gasteropodi, con subordinati depositi sabbioso-limosi e calciruditi di stagno costiero. Spessore: fino a 3-4 m. ?PLEISTOCENE SUP. - ?OLOCENE
	Depositi di spiaggia. Sabbie e ghiaie, talvolta con molluschi, etc. OLOCENE
	Depositi di versante. Detriti con clasti angolosi, talora parzialmente cementati. OLOCENE
	Depositi eolici. Sabbie di duna ben classate. OLOCENE
	Depositi lacustri, palustri. Argille molto plastiche, localmente ricche di materia organica, talvolta con sottili intercalazioni di sabbie contenenti gusci di bivalvi ( <i>Cerastoderma edule</i> ), di gasteropodi polmonati ( <i>Hydrobia ventrosa</i> ) e ostracodi ( <i>Cypride</i> )
	Depositi lacustri, palustri. Limi ed argille grigio scure con intercalazioni sabbiose. OLOCENE
	Depositi lacustri. Calcarei lacustri talvolta con gasteropodi polmonati. OLOCENE
	Depositi palustri. Limi ed argille limose talvolta ciottolose, fanghi torbosi con frammenti di molluschi. OLOCENE
	Litofacies nel Subintema di Portoscuso (SINTEMA DI PORTOVESME). Ghiaie alluvionali terrazzate da medie a grossolane, con subordinate sabbie. PLEISTOCENE SUP.
	Litofacies nel Subintema di Portoscuso (SINTEMA DI PORTOVESME). Sabbie e arenarie eoliche con subordinati detriti e depositi alluvionali. PLEISTOCENE SUP.

Le stratigrafie sono mostrate in dettaglio nell'Allegato 1.

Il letto dell'acquifero freatico è stato identificato con il primo strato di roccia considerata impermeabile secondo la classificazione riportata nella tabella 5.2.

Per quanto riguarda la zona 1, ossia la Bonifica di Arborea, a partire dalla linea 5 e procedendo verso Sud, e da Ovest verso Est, si ha il primo strato impermeabile alle profondità indicate nella tabella 5.3.

Zona	Linea	Stratigrafia	Profondità primo strato impermeabile	Litologia
1	5	27 Staffa	6,8 m	Argilla compatta
		26 Staffa	5,5 m	Sabbia fine e argilla compatta
		P 37 Ar	5 m	Argilla sabbiosa
1	6	2 Staffa	7,9 m	Argilla sabbiosa e poi compatta
		3 Staffa	8,3 m	Argilla compatta
		ICDS 1	7 m	Limo argilloso
1	7	ICDS 2	6,5 m	Limo argilloso
		4 Staffa	4,50 m	Argilla compatta
		P 30 Ar	6,50 m	Argilla
		P 34 Ar	2,50 m	Argilla
		P 42 Ar	19 m	Argilla
1	8	P 12 Ar	25 m	Argilla
		5 Staffa	5 m	Sabbia siltosa
		GC 114	8 m	Argilla
		6 Staffa	2,9 m	Arenaria a cemento carbonatico
		13 Staffa	6,40 m	Argilla compatta
		29 Staffa	7,80 m	Argilla sabbiosa compatta
		14 Staffa	3,65 m	Argilla sabbiosa compatta a granuli carbonatici
		28 Staffa	12,40 m	Argilla sabbiosa compatta
		8 Staffa	2 m	Sabbia argillosa compatta
		GC 115	8 m	Argilla
		GC 113	10 m	Argilla
		9 Staffa	6 m	Argilla sabbiosa e argilla compatta
1	9	21 Staffa	4 m	Sabbia fine siltosa
		30 Staffa	8,60 m	Argilla limosa
		10 Staffa	10,10 m	Argilla compatta
		22 Staffa	9 m	Sabbia siltosa compatta
		17 Staffa	3,30 m	Argilla con grossi noduli carbonatici
		11 Staffa	2,45 m	Argilla compatta
1	10	23 Staffa	10,50 m	Argilla compatta
		24 Staffa	7 m	Argilla compatta
		12 Staffa	4,20 m	Argilla compatta
		25 Staffa	5 m	Argilla compatta

**Tabella 5.3. Profondità del primo strato impermeabile desumibile dalle stratigrafie della zona 1 lungo le linee specificate**

Il letto della falda varia, mediamente, da valori intorno ai 4-8 m in prossimità della fascia costiera, più elevati nel centro della Bonifica (6-15 m) e più bassi nella parte orientale (6-3 m).

Nella zona 2, a partire dalla linea 1 e procedendo verso Sud, da Ovest verso Est, si ha la situazione indicata nella tabella 5.4.

Zona	Linea	Stratigrafia	Profondità primo strato impermeabile	Litologia
2	1	ICOS 6	16 m	Argilla compatta
		ICOS 8	15 m	Argilla dura
		ICOS 9	10,2 m	Argilla sabbiosa
		ICOS 10	12,5 m	Argilla
		ICOS 7	11,3 m	Argilla
		P 26 Or	23 m	Argilla
		P 1 Or	24 m	Argilla sabbiosa
		GC 84	10 m	Sabbia fine a matrice argillosa
		P 2 Or	15 m	Argilla con sabbia e conglomerato
		P 3a Or	18,50 m	Argilla sabbiosa
		P 3 Or	22 m	Argilla compatta
	2	P 25 PA	7 m	Argilla
		P 8 Or	10,80 m	Argilla
		P 9 Or	6,50 m	Argilla sabbiosa
		P 6 Or	18 m	Argilla e sabbia
2	3	GC 43	9 m	Argilla
		P 24 SG	12 m	Argilla
		P 14 SG	18 m	Argilla compatta
		P 19 PA	14,50 m	Argilla
2	4	P 16 SG	5 m	Argilla
		P 15 SG NE	9 m	Argilla
		P 18 SG NE	8 m	Argilla
		P 27 SG NE	10 m	Argilla e sabbia
		P 28 SG	9 m	Argilla
		P 47 SG	15 m	Argilla
		P 43 SG	13 m	Argilla
		P 46 SG	10 m	Argilla
2	5	P 41 Ar	20 m	Argilla
		P 36 Ar	16,80 m	Argilla
		P 8 Ma	17 m	Argilla
		P 3 Ma	28 m	Argilla e sabbia fine
2	7	P 32 Ma	21,50 m	Argilla
		P 33 Ma	20 m	Argilla
2	9	GC 78	12 m	Argilla

**Tabella 5.4. Profondità del primo strato impermeabile desumibile dalle stratigrafie della zona 2 lungo le linee specificate.**

In questo secondo caso il letto della falda, procedendo da Ovest verso Est, varia mediamente tra 5 e 20 m nelle zone prossime agli stagni, tra 7 e 28 m nella porzione centrale e tra 10 e 20 m nella parte più ad Est.

Come si può osservare nella figura 5.10 le stratigrafie non ricoprono omogeneamente l'area di studio, ci sono delle zone completamente scoperte, per le quali sono state fatte delle supposizioni riguardo il tipo di litologia presente. Tali supposizioni possono essere supportate da un altro tipo di informazione che è stato possibile reperire, ossia dei Sondaggi Elettrici Verticali (SEV) realizzati nell'area. I dati ricavati dalle stratigrafie e dai SEV sono stati messi a confronto ed è stata proposta una possibile interpretazione della geologia, in particolare della Bonifica di Arborea, come si vedrà nei capitoli seguenti.

## **CAPITOLO 6**

### **I Sondaggi Elettrici Verticali (SEV)**

#### **6.1 Introduzione**

Il sottosuolo può essere studiato attraverso indagini di tipo indiretto, che misurano la variazione di alcune caratteristiche e consentono poi di risalire al tipo di materiale presente, o diretto, con le quali vengono misurate direttamente e in modo dettagliato le caratteristiche che interessano (Mandaglio, 2013). Le indagini indirette, delle quali fa parte il metodo utilizzato nel presente lavoro, utilizzano le variazioni, rilevabili in superficie, di alcuni parametri geofisici per la definizione della geometria e delle caratteristiche di corpi geologici sepolti; si dividono in metodi che impiegano campi naturali (misurano un campo di forze sulla superficie terrestre e cercano di individuare le anomalie dovute a disomogeneità del terreno, ad esempio la prospezione gravimetrica e la prospezione magnetica), e metodi che impiegano campi artificiali (studiano il comportamento di un campo artificiale che può venire influenzato da corpi o strutture sepolte, ad esempio la prospezione elettrica e la prospezione sismica). I parametri comunemente utilizzati sono la conducibilità elettrica, l'elasticità, la densità e la suscettività magnetica, e ad ognuno di essi corrisponde uno specifico metodo di indagine: elettrico, sismico, gravimetrico e magnetico rispettivamente (Fagioli, 2008).

In generale gli obiettivi della prospezione geofisica sono: ricostruire la stratigrafia del sottosuolo in base ad alcuni parametri fisici che caratterizzano le varie unità litostratigrafiche, stabilire la posizione della superficie della falda freatica o la presenza di corpi idrici sotterranei. Nella prospezione idrogeologica le metodologie più utilizzate sono la geoelettrica, l'elettromagnetica e la sismica a riflessione e a rifrazione (Fagioli, 2008).

#### **6.2 Il metodo geoelettrico**

##### **6.2.1 La resistività elettrica**

Nella prospezione geoelettrica il parametro fisico che si determina è la resistività elettrica  $\rho$  delle formazioni che costituiscono il sottosuolo. La resistività è un parametro indipendente dalle caratteristiche geometriche della formazione litologica ed è definita come la resistenza  $R$  incontrata dalla corrente elettrica  $I$  nell'attraversare una formazione

rocciosa (Adamoli et al., 2012). La corrente che passa aumenta in proporzione alla differenza di potenziale  $V$ , come espresso dalla legge di Ohm:

$$V/I = R$$

Mentre  $R$  dipende sia dal materiale che dalla forma, la resistività  $\rho$  è una caratteristica solo del materiale. Considerando un filo conduttore di lunghezza  $l$  e sezione  $A$ , per la seconda legge di Ohm si ha:

$$R = \rho (l/A)$$

da cui:

$$\rho = R (A/l)$$

La resistività si esprime in ohm ( $\Omega$ ) x m.

Nella tabella seguente sono riportati i valori di resistività di alcune sostanze.

Rocce e minerali metallici	Resistività ( $\Omega m$ )
<b>Sedimentarie</b>	
Calcere chalk	$50 \div 150$
Argilla (clay)	$1 \div 100$
Ghiaia (gravel)	$100 \div 5000$
Calcere (limestone)	$50 \div 10^7$
Marna (marl)	$1 \div 100$
Quarzite (quartzite)	$10 \div 10^8$
Argilla (shale)	$10 \div 1000$
Sabbia (sand)	$500 \div 5000$
Arenaria (sandstone)	$1 \div 10^8$
<b>Ignee e Metamorfiche</b>	
Basalto	$10 \div 10^7$
Gabbro	$10^3 \div 10^6$
Granito	$10^2 \div 10^6$
Marmo	$10^2 \div 10^8$
Scisto	$10 \div 10^4$
Ardesia	$10^2 \div 10^7$
<b>Minerali e minerali metallici</b>	
Argento	$1,6 \cdot 10^{-8}$
Grafite (giacimento massivo)	$10^{-4} \div 10^{-3}$
Galena (Pbs)	$10^{-3} \div 10^2$
Magnetite di giacimento	$1 \div 10^5$
Sfalerite (ZnS)	$10^3 \div 10^6$
Pirite	$10^2$
Calcopirite	$10^{-5} \div 0,3$
Quarzo	$10^{10} \div 2 \cdot 10^{14}$
Salgemma	$10 \div 10^{13}$
<b>Acque ed effetto del contenuto in sale</b>	
Acqua pura	$10^6$
Acque naturali	$1 \div 10^3$
Acqua di mare	0,2
Sale 20%	$5 \cdot 10^{-2}$
Granito 0% di acqua	$10^{10}$
Granito 0,19% di acqua	$10^6$
Granito 0,31% di acqua	$4 \cdot 10^3$

**Tabella 6.1. Valori di resistività di alcune rocce e minerali (da: Soldovieri, 2005)**

La maggior parte delle rocce ha resistività intermedia, gran parte dei minerali che le compongono sono buoni isolanti, ma le rocce hanno sulla superficie pori e fessure che di solito contengono almeno un velo d'acqua e spesso ne sono piene. Poiché l'acqua sotterranea ha resistività piuttosto basse, la resistività della roccia dipende prevalentemente dalla sua porosità e dal grado di saturazione in acqua dei pori. Dipende anche dall'acqua: l'acqua pura è un ottimo isolante, mentre le acque naturali contengono disciolti sali di vario tipo, che derivano di solito dalla degradazione meteorica delle rocce. La salinità dell'acqua nei pori è generalmente bassa ma può essere alta se, per esempio, l'acqua sotterranea è contaminata con acqua di mare o perchè l'evaporazione ha fatto

concentrare i sali. Quando in una roccia è presente argilla si verifica un fenomeno importante, l'adsorbimento cationico, cioè la cattura da parte della superficie esterna dei granuli di argilla, dotata di debole carica negativa, di cationi presenti nella soluzione. Il legame è debole cosicché l'applicazione di un campo elettrico esterno, anche di scarsa entità, rimobilizza tali cationi. La conseguenza di ciò è che l'argilla è sempre molto ricca di cationi adsorbiti e pertanto è, generalmente, un buon conduttore.

Dal momento che ci sono molti parametri che influenzano la resistività globale è praticamente impossibile ricavare una correlazione biunivoca resistività/tipo di roccia, sono necessarie altre informazioni, quali quelle desumibili, ad esempio, dalle stratigrafie.

#### 6.2.2 I Sondaggi Elettrici Verticali (SEV)

Attraverso i SEV si misura una resistività detta apparente, perché le linee di corrente che consentono di valutare tale parametro hanno attraversato più formazioni rocciose: misuriamo cioè un valore anomalo rispetto a quello che si misurerebbe in un sottosuolo omogeneo ed isotropo. Questo dato non è semplicemente il valore medio delle resistività degli elettrostrati incontrati, ma è definito da una funzione più complessa in quanto dipende sia dalle resistività dei vari litotipi attraversati che dai loro spessori (Soldovieri, 2005). Ed è proprio grazie al fatto che la distribuzione della resistività apparente è legata allo spessore, alla localizzazione, alla forma e alla resistività dei litotipi che, da questa misura, si possono ottenere informazioni sulle discontinuità presenti nel sottosuolo. In generale la resistività apparente può essere definita come la resistività vera di una roccia immaginaria (omogenea ed isotropa) equivalente ad una reale eterogenea ed anisotropa (Soldovieri, 2005).

Un'indagine geoelettrica inizia con lo stabilire collegamenti elettrici attraverso 4 elettrodi (configurazione a quadripolo): viene immessa corrente continua, fornita da una serie di pile a secco o da un generatore, attraverso due elettrodi esterni A e B; tramite i due elettrodi centrali M ed N viene misurata la differenza di potenziale generata nel sottosuolo al passaggio di corrente tra A e B.

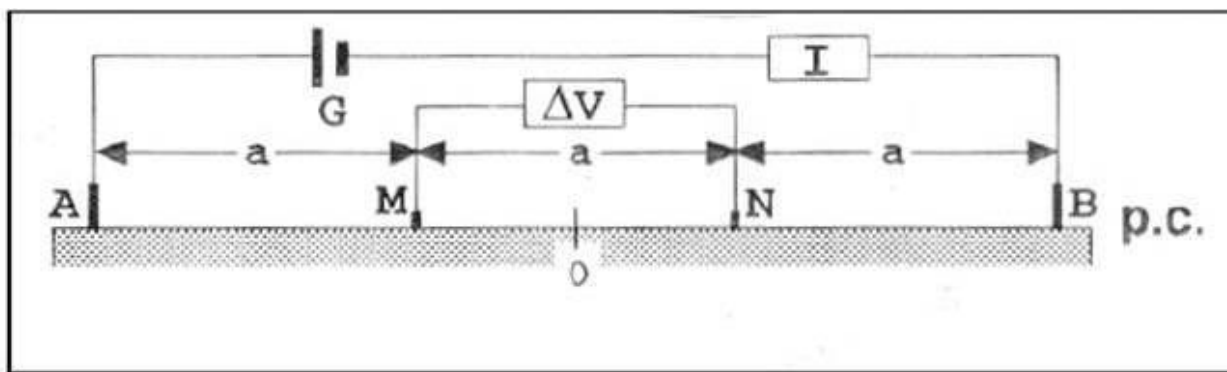


Figura 6.1. Dispositivo che mostra la configurazione a quadripolo (da:Mandaglio, 2013)

Le misure di  $V$  ed  $I$  vengono effettuate con strumenti di precisione, dotati di azzeratore dei potenziali spontanei esistenti nel terreno. Da queste misure si ricava la resistività apparente  $\rho_a$  del terreno, secondo la formula:

$$\rho_a = K (V/I)$$

dove  $K$  è il fattore geometrico, che dipende esclusivamente dalla posizione degli elettrodi di corrente  $A$  e  $B$  rispetto agli elettrodi di potenziale  $M$  ed  $N$ . Ipotezzando di eseguire le misure su un semispazio a resistività omogenea (cioè che il terreno abbia la stessa resistività a tutte le profondità) il fattore geometrico  $K$  è quel valore che servirebbe a fare in modo che il rapporto  $(V/I)K$  fosse esattamente uguale al valore di resistività del semispazio.

La resistività reale del terreno, invece, è propria del terreno stesso, e provoca quella apparente, ottenibile dalle misure applicando la formula  $\rho_a = K (V/I)$ ; la resistività apparente si può definire il "dato di campo" da cui quella reale si ricava attraverso un processo di inversione effettuato da un opportuno modello matematico.

Aumentando progressivamente la distanza fra  $A$  e  $B$  e mantenendo fisso il centro del quadripolo, aumenta il volume di terreno interessato dal passaggio della corrente. La profondità di indagine è funzione, oltre che della distanza  $AB$  fra gli elettrodi, della resistività degli strati attraversati: a parità di  $AB$ , maggiore è la resistività degli strati, maggiore sarà la profondità raggiunta dalla corrente.

In relazione alla posizione reciproca degli elettrodi di corrente rispetto a quelli di potenziale, è possibile realizzare vari tipi di configurazioni elettrode o array; le più comuni sono quella di Wenner e quella di Schlumberger (figure 6.2 e 6.3). Quest'ultima è la più utilizzata.



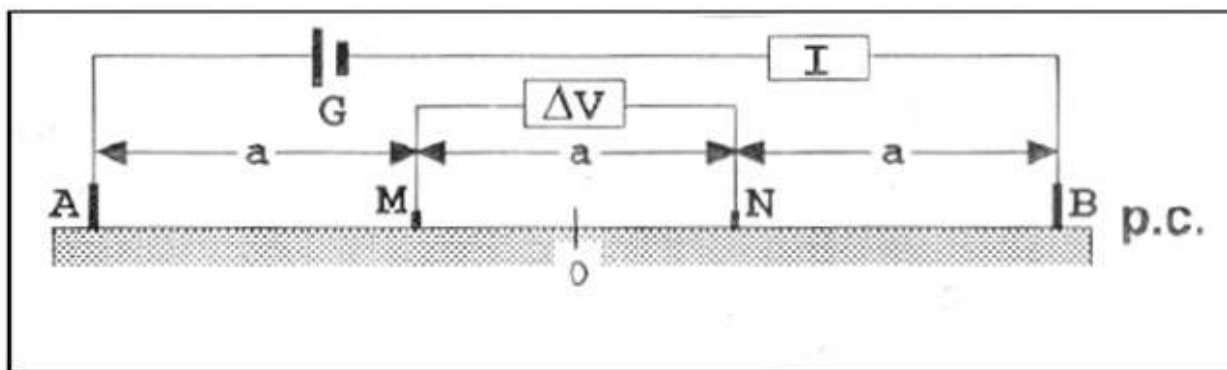


Figura 6.2. Dispositivo di Wenner: i 4 elettrodi sono equidistanti (da:Mandaglio, 2013)

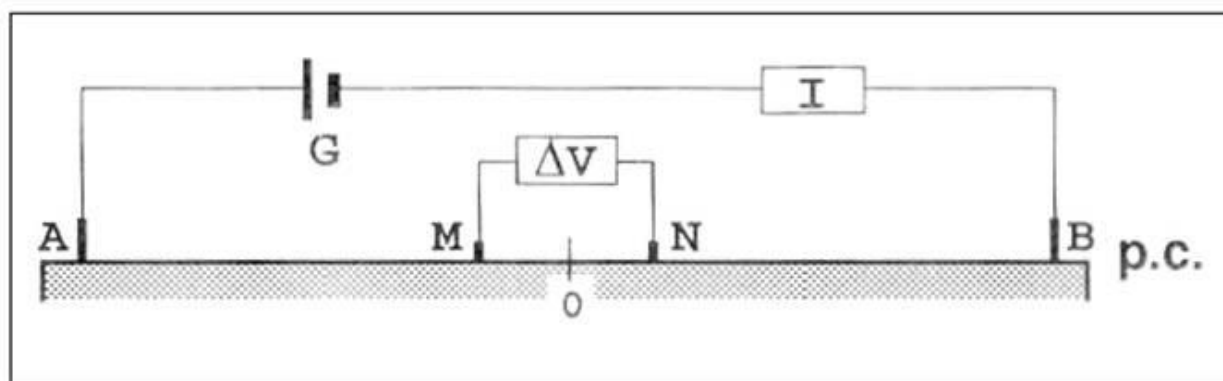
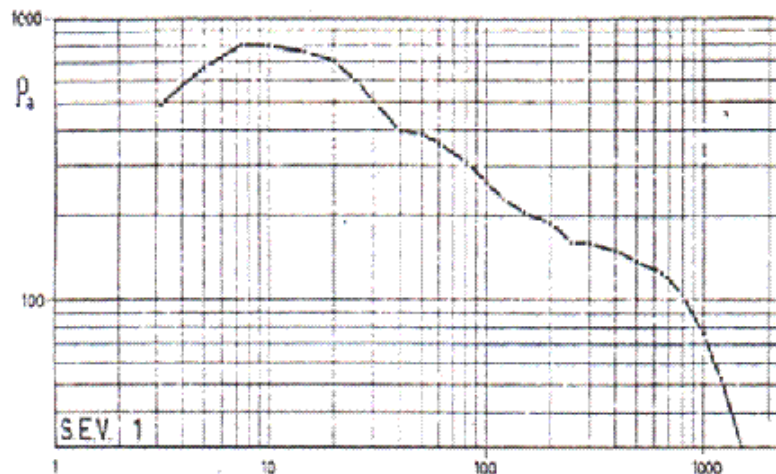


Figura 6.3. Dispositivo di Schlumberger: la distanza fra gli elettrodi di corrente A e B è molto maggiore di quella fra gli elettrodi di potenziale M ed N (da:Mandaglio 2013)

Il quadripolo di Schlumberger è costituito da una linea, munita di amperometro, con la quale si immette nel sottosuolo una corrente elettrica di intensità nota  $I$ , facendola passare per gli elettrodi A e B; su una seconda linea MN, munita di potenziometro, si misura la differenza di potenziale  $\Delta V$  che si crea per la resistenza opposta dalla roccia al passaggio della corrente. I quattro elettrodi sono allineati e disposti simmetricamente rispetto al centro del dispositivo, che deve essere mantenuto fisso; inoltre la distanza MN è in genere  $1/4$  della distanza AB. Essi sono collegati al misuratore di resistività. Si fanno letture ed i valori vengono tabulati. L'espansione dello stendimento viene interrotta quando si ritiene che la corrente sia penetrata a sufficiente profondità, circa  $1/2$  o  $1/3$  della distanza tra gli elettrodi A e B. Per ogni distanza si calcola  $\rho_a = K (V/I)$ ; nel dispositivo Schlumberger,  $K = \pi (AM \cdot AN / MN)$ . Riportando i valori di resistività apparente su un diagramma bilogarithmico si ottengono le curve di resistività apparente, in cui i valori di  $AB/2$  sulle ascisse sono espressi in metri, mentre quelli di resistività, sulle ordinate, in  $\text{ohm} \cdot \text{m}$ .



**Figura 6.4. Curva di resistività.**

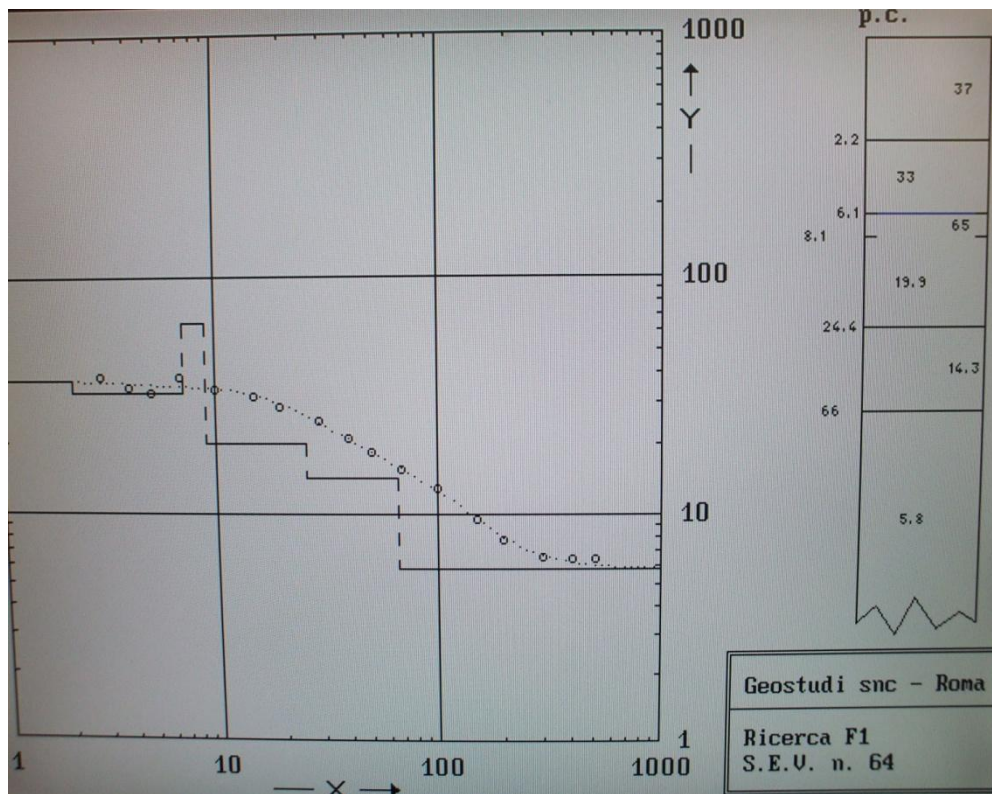
L'interpretazione di una curva di resistività consiste nella determinazione della resistività e dello spessore dei vari strati che costituiscono il sottosuolo (si presuppone l'esistenza di strati con giacitura orizzontale e resistività omogenea al loro interno). L'interpretazione avviene generalmente in due fasi successive: la prima prevede la determinazione qualitativa del tipo di curva (a due, tre o più strati), la seconda consiste nell'interpretazione quantitativa, che può avvenire tramite il confronto diretto con curve pre-calcolate (curve fondamentali o abachi) o tramite l'utilizzo di programmi di calcolo dedicati.

In generale, mentre le curve a due strati permettono la determinazione diretta sia delle resistività che dello spessore del primo strato, le curve a tre strati permettono di determinare quantitativamente solo il rapporto tra spessore e resistività degli strati (nel caso di uno strato conduttivo tra due resistivi) o il loro prodotto (nel caso di uno strato resistivo tra due conduttivi). In questi casi è essenziale disporre di dati al contorno che consentano di definire uno dei due parametri per ottenere l'altro. Un altro limite di tale metodologia è che maggiore è la profondità di uno strato, maggiore deve essere il suo spessore affinché il suo effetto sia rilevabile sulla curva di resistività.

Il risultato finale a cui si giunge con i SEV è una colonna di resistività, per la quale ad ogni valore di  $\rho$  corrisponde un'interpretazione litologica. Questa fase è molto delicata perché spesso la resistività varia anche del 30% all'interno di una singola formazione. Inoltre è possibile che le interfacce elettriche non siano limiti geologici: può trattarsi della falda freatica o di brusche variazioni nella salinità o nel contenuto di argilla; d'altra parte, un limite geologico può non essere riconoscibile se separa strati con scarso contrasto

elettrico. L'interpretazione geologica deve quindi basarsi su una sicura conoscenza della geologia quale viene rivelata dalle stratigrafie.

Nel presente lavoro il processo di inversione è stato effettuato con il software SEVDos, che ha permesso di ottenere le curve di resistività reale e la colonna con gli spessori di ogni strato e i valori di resistività associati, come mostra la figura 6.5.



**Figura 6.5. Esempio di curva di resistività. Nella colonna sono rappresentate le profondità di ogni strato (all'esterno) ed i valori di resistività associati (all'interno).**

I risultati delle interpretazioni dei SEV sono illustrati nel capitolo seguente.

## **CAPITOLO 7**

### **Interpretazione di SEV e stratigrafie**

#### **7.1 Introduzione**

Il Progetto Speciale n.25 della Cassa per il Mezzogiorno, per il potenziamento e reperimento delle risorse idriche in Sardegna, fa parte di una serie di progetti volti a risolvere, in modo coordinato, sul piano territoriale come su quello settoriale, il problema delle risorse idriche, al fine di garantire non solo lo sviluppo dell'agricoltura, ma anche della vita civile e sociale nel Mezzogiorno. Nell'ambito della II fase del Progetto 25, riguardante lo studio organico delle risorse idriche sotterranee della Sardegna, la società ARLAB-ITALPROS, su richiesta dell'Istituto di Geopedologia e Geologia Applicata dell'Università di Sassari, ha effettuato una prospezione geoelettrica dell'intera pianura del Campidano mediante SEV, il cui scopo era precisare la ripartizione e l'andamento strutturale degli acquiferi presenti e, in base ai risultati, proporre un programma di perforazioni di ricognizione che dovevano essere ubicate nelle posizioni più favorevoli individuate dalla geofisica. Le operazioni di campagna si sono svolte tra il 12/12/1980 ed il 12/6/1981 a cura dei geofisici E. Dai Pra, G. Montois, J.P. Vinter e sotto la supervisione dell' Ing. J. Mouton; in tutto il Campidano sono stati eseguiti 577 sondaggi elettrici, di cui 477 con stendimento AB = 1000 m e 98 con stendimento AB = 1500-2000 m (Università degli Studi di Sassari, 1996). Nell'area di studio ricadono 84 dei 577 SEV (tabelle 7.1 e 7.2).

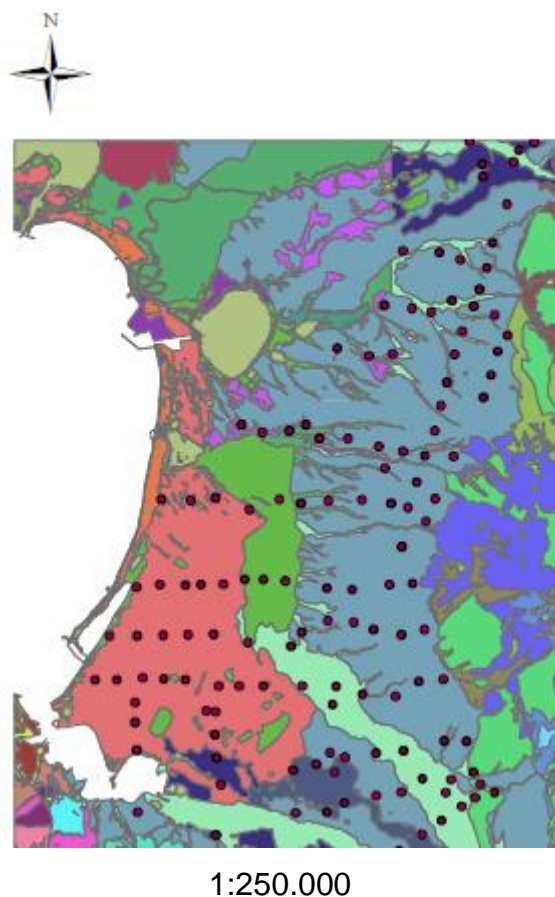
E' stato creato un database con le coordinate dei punti in cui sono stati effettuati i SEV ed importato nel software ArcGIS 10, in modo tale da avere la distribuzione delle informazioni nello spazio, come mostra la figura 7.1. Successivamente si è cercato di integrare le informazioni derivanti dalle stratigrafie con quelle dei SEV, come si vedrà nei paragrafi seguenti.

<b>Identif_SEV</b>	<b>Longitudine EST</b>	<b>Latitudine NORD</b>	<b>Coll_IGM 1:100000</b>
D1	1471965	4416372	F 217 IV SE Oristano
D2	1473456	4416306	F 217 IV SE Oristano
D3	1474314	4416002	F 217 IV SE Oristano
D4	1471199	4414141	F 217 IV SE Oristano
D5	1472334	4414009	F 217 IV SE Oristano
D6	1473113	4413864	F 217 IV SE Oristano
D7	1473958	4414326	F 217 IV SE Oristano
D9	1470566	4412038	F 217 IV SE Oristano
D10	1471529	4412131	F 217 IV SE Oristano
D11	1474393	4413068	F 217 IV SE Oristano
D12	1474063	4412104	F 217 IV SE Oristano
E3	1475398	4415665	F 217 I SO Villaurbana
E4	1475095	4414798	F 217 I SO Villaurbana
E5	1474853	4414092	F 217 I SO Villaurbana
E6	1475720	4413749	F 217 I SO Villaurbana
E7	1476245	4412902	F 217 I SO Villaurbana
E8	1475841	4412237	F 217 I SO Villaurbana
F1	1462048	4406167	F 217 III NO Capo della Frasca
F2	1463258	4406126	F 217 III NO Capo della Frasca
F3	1461040	4402537	F 217 III NO Capo della Frasca
F4	1461987	4402658	F 217 III NO Capo della Frasca
F5	1463056	4402638	F 217 III NO Capo della Frasca
F6	1459930	4400561	F 217 III NO Capo della Frasca
F7	1461060	4400561	F 217 III NO Capo della Frasca
F8	1462129	4400581	F 217 III NO Capo della Frasca
F9	1463157	4400601	F 217 III NO Capo della Frasca
G1	1465335	4409232	F 217 III NE Arborea
G2	1466202	4408909	F 217 III NE Arborea
G4	1467977	4409232	F 217 III NE Arborea
G6	1469711	4408667	F 217 III NE Arborea
G7	1470961	4408325	F 217 III NE Arborea
G8	1471949	4408123	F 217 III NE Arborea
G10	1473260	4408970	F 217 III NE Arborea
G14	1464266	4406227	F 217 III NE Arborea
G15	1465678	4405743	F 217 III NE Arborea
G16	1466908	4406167	F 217 III NE Arborea
G17	1467775	4405985	F 217 III NE Arborea
G18	1468904	4406106	F 217 III NE Arborea
G19	1470276	4406147	F 217 III NE Arborea
G20	1471465	4405985	F 217 III NE Arborea
G21	1472171	4405824	F 217 III NE Arborea
G23	1473298	4406193	F 217 III NE Arborea
G24	1471918	4404214	F 217 III NE Arborea
G25	1463690	4402651	F 217 III NE Arborea
G26	1464601	4402678	F 217 III NE Arborea

**Tabella 7.1. SEV ricadenti nell'area di studio (parte I)**

<b>Identif_SEV</b>	<b>Longitudine EST</b>	<b>Latitudine NORD</b>	<b>Coll_IGM 1:100000</b>
G27	1465486	4402860	F 217 III NE Arborea
G28	1466241	4402860	F 217 III NE Arborea
G29	1467127	4402808	F 217 III NE Arborea
G30	1468845	4402495	F 217 III NE Arborea
G31	1469887	4402443	F 217 III NE Arborea
G32	1471397	4402651	F 217 III NE Arborea
G33	1472360	4402704	F 217 III NE Arborea
G34	1464184	4400621	F 217 III NE Arborea
G37	1467804	4400639	F 217 III NE Arborea
G38	1468897	4401167	F 217 III NE Arborea
G39	1469939	4401115	F 217 III NE Arborea
G40	1470746	4400803	F 217 III NE Arborea
G41	1471892	4400594	F 217 III NE Arborea
G42	1472855	4400803	F 217 III NE Arborea
H1	1459341	4398746	F 217 III SO S.Antonio di Santadi
H2	1460227	4398746	F 217 III SO S.Antonio di Santadi
H3	1461294	4398824	F 217 III SO S.Antonio di Santadi
H5	1463039	4398746	F 217 III SO S.Antonio di Santadi
H7	1460982	4397001	F 217 III SO S.Antonio di Santadi
J1	1464400	4398493	F 217 III SE Terralba
J2	1465244	4398493	F 217 III SE Terralba
J3	1466236	4398493	F 217 III SE Terralba
J8	1471651	4398068	F 217 III SE Terralba
J9	1472603	4398666	F 217 III SE Terralba
J10	1473611	4398759	F 217 III SE Terralba
J11	1464277	4397415	F 217 III SE Terralba
J11bis	1463903	4397471	F 217 III SE Terralba
J12	1464258	4396500	F 217 III SE Terralba
J13	1464314	4395548	F 217 III SE Terralba
J14	1464482	4394428	F 217 III SE Terralba
J15	1467450	4395025	F 217 III SE Terralba
J16	1468403	4395286	F 217 III SE Terralba
J17	1468963	4395753	F 217 III SE Terralba
J18	1469597	4395566	F 217 III SE Terralba
J19	1470848	4395734	F 217 III SE Terralba
J20	1471968	4395828	F 217 III SE Terralba
J21	1473649	4396239	F 217 III SE Terralba
J22	1469168	4394950	F 217 III SE Terralba
K1	1474564	4396226	F 217 II SO Mogoro

**Tabella 7.2. SEV ricadenti nell'area di studio (parte II)**

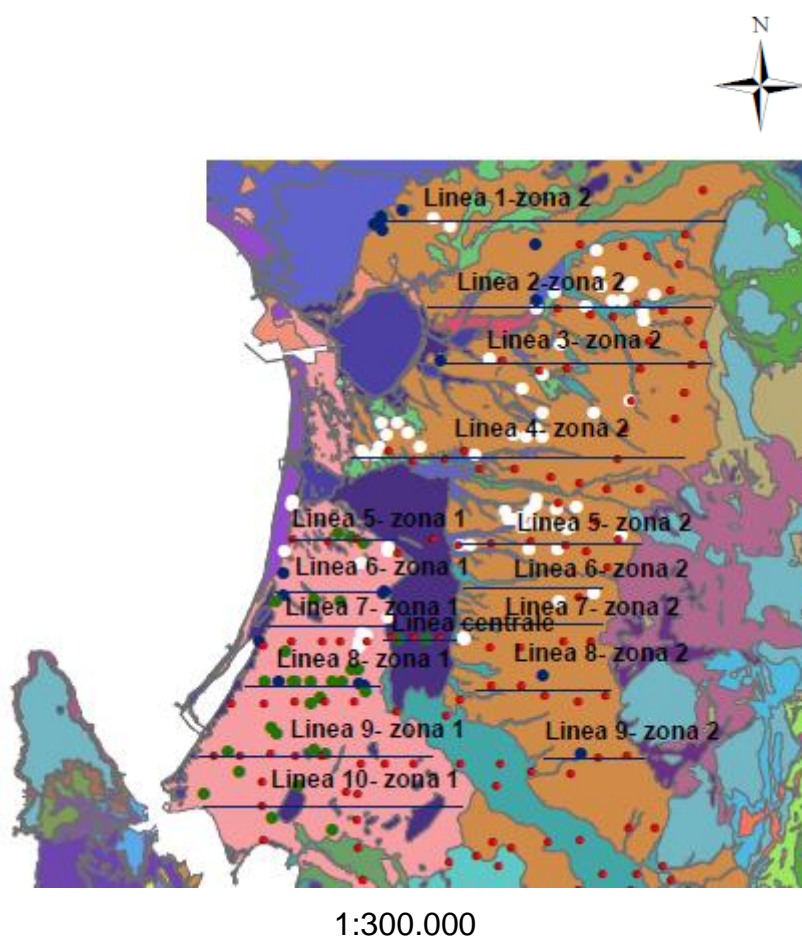


**Figura 7.1. Localizzazione dei SEV nell'area di studio**

## **7.2 Trattamento analitico dei dati**

Sono state analizzate le curve di resistività apparente relative ai SEV realizzati nell'area di studio, dalle quali sono stati estrapolati i valori di  $\rho_a$  per alcuni stendimenti AB/2 (3m, 4m, 5m, 7m, 10m, 15m, 20m, 30m, 40m, 50m, 70m, 100m, 150m, 200m, 300m, 400m, 500m, 700m e 1000m). Tali valori sono stati implementati nel software SEVDos, che ha restituito le curve di resistività reale e i valori di  $\rho_r$  per ogni strato attraversato. I dati sono stati raccolti in un database (Allegato II). Queste informazioni sono state poi correlate con quelle derivanti dalle stratigrafie; per prima cosa si è creata una mappa attraverso il software ArcGIS10, rappresentata nella figura 7.2.





**Figura 7.2.** Linee lungo le quali sono distribuite le stratigrafie (in bianco, verde e blu) e i SEV (in rosso)

La profondità di indagine dei SEV supera grandemente quella delle stratigrafie, ma dovendo studiare solo la falda superficiale, il cui letto si trova a circa 12-15 m s.l.m., sono state considerate prevalentemente le profondità delle stratigrafie.

La porzione settentrionale (linee 1-4, zona 2), e in generale la zona 2, è stata studiata in modo sommario, sia per la carenza di informazioni, sia perchè si è scelto di concentrarsi sulla Bonifica di Arborea. In generale si evince che è presente un complesso sabbio-ghiaioo-argilloso, che in base agli elevati valori di resistività sembrerebbe a tratti imbevuto d'acqua; a profondità maggiori (circa 80 m) è presente ghiaia e sabbione con ciottoli.

L'area compresa, da Ovest verso Est, tra la linea di costa e le pendici del Monte Arci presenta la seguente geologia di massima (figura 7.2):

- litofacies nel Subsintema di Portoscuso (Sintema di Portovesme). Ghiaie alluvionali terrazzate da medie a grossolane, con subordinate sabbie. Pleistocene superiore (area arancio);



- depositi di spiaggia antichi. Sabbie, arenarie, calciruditi, ghiaie con bivalvi, gasteropodi, con subordinati depositi sabbioso-limosi e calcilutiti di stagno costiero. Spessore fino a 3-4 m. Pleistocene superiore-Olocene (area rosa);
- depositi palustri. Limi ed argille limose talvolta ciottolose, fanghi torbosi con frammenti di molluschi. Olocene (area viola);
- depositi alluvionali. Olocene (area azzurra).

L'analisi delle stratigrafie e dei SEV ricadenti in quest'area ha permesso di fare delle ipotesi sulla geologia più profonda. Come detto nel capitolo precedente, associare ad un valore di resistività una specifica litologia non è semplice, ma può essere di aiuto conoscere l'età della formazione (ad esempio, calcari marnosi ed arenarie del Miocene hanno una  $\rho$  compresa fra 30 e 60 ohm.m); perciò si è scelto di considerare le corrispondenze fra tipologie di terreni (fornite dalla geologia di superficie e dalle stratigrafie) e campi di resistività riportate nella relazione idrogeologica del Progetto Speciale 25, sintetizzate nella tabella seguente.

Formazione rocciosa	Resistività ( $\Omega$ .m)
Terreni salati superficiali (Quaternario)	0.5-5
Limi superficiali (Quaternario)	10-20
Complesso sabbio-ghiaio-argilloso imbevuto (Quaternario)	15-150
Complesso sabbio-ghiaio-argilloso asciutto (Quaternario)	100-1000
Complesso di base argillo-sabbioso (Quaternario)	5-10
Calcari marnosi, arenarie (Miocene)	30-60
Marne, argille (Miocene)	3-15
Vulcaniti e Paleozoico	30-100

**Tabella 7.1. Corrispondenza fra tipologie di terreni/rocce e campi di resistività (da: Progetto Speciale 25, Relazione idrogeologica)**

Per quanto riguarda la Bonifica di Arborea, i valori di resistività desumibili dai SEV e le stratigrafie sono in accordo nel rivelare una geologia abbastanza uniforme, rappresentata da sabbie medio-grossolane e ghiaie fino ad una profondità di circa 15 m, e poi argilla

sabbiosa, sabbia argillosa, sabbia fine ed argilla compatta. Queste caratteristiche geologiche sono coerenti con gli studi idrogeologici effettuati, secondo i quali l'acquifero freatico avrebbe un letto argilloso a 10-15 m sotto il livello del mare (Barrocu et al., 2006).

Verso Sud è presente sabbia media e fine a scarsa matrice fino a 5-8 m di profondità, e poi limo, limo argilloso ed argilla: in questa zona il letto dell'acquifero sembra essere meno profondo.

L'area dell'ex stagno di Sassu, del quale in seguito alle opere di bonifica è rimasto solo lo stagno di S'Ena Arrubia, è una zona argilloso-limosa di spessore variabile fra 10 m e 40 m, ed è depressa, come dimostrano i valori delle quote rispetto al livello medio del mare (talvolta sotto lo zero); la Carta Gravimetrica della Sardegna presenta in corrispondenza dell'area in questione un'anomalia negativa: le anomalie sono la conseguenza della distribuzione disomogenea, nella crosta terrestre o nella litosfera, di masse rocciose aventi diverse densità, e nel caso specifico conferma l'esistenza di una depressione .

I profili di resistività eseguiti nella zona a cavallo del Sassu mostrano un brusco abbassamento nell'ex stagno (cioè la presenza di un mezzo conduttivo come l'argilla o il limo con acqua salata) ed un innalzamento nelle due zone confinanti. L'ex Sassu rappresenta un ostacolo al flusso dell'acqua di falda, come dimostra il campo di moto dell'acquifero: infatti le isopieze si dispongono parallelamente e la spaziatura fra le stesse diminuisce bruscamente mentre aumenta il gradiente, ossia l'acclività del profilo piezometrico (figura 4.7); nella bonifica di Arborea invece la spaziatura è pressoché costante, il gradiente diminuisce verso il mare e le linee di flusso indicano una chiara direzione del moto delle acque da Est verso Ovest e da Sud verso Nord (cioè verso il mare e gli stagni).

Procedendo verso Sud, l'area ad Est della Bonifica di Arborea, in base ai valori di resistività, sembra presentare materiali conduttori nella parte superficiale (limo, limo argilloso, argilla), un complesso sabbio-ghiaio-argilloso resistente ed un complesso conduttore costituito da argille del Plio-Pleistocene e forse marne del Miocene.

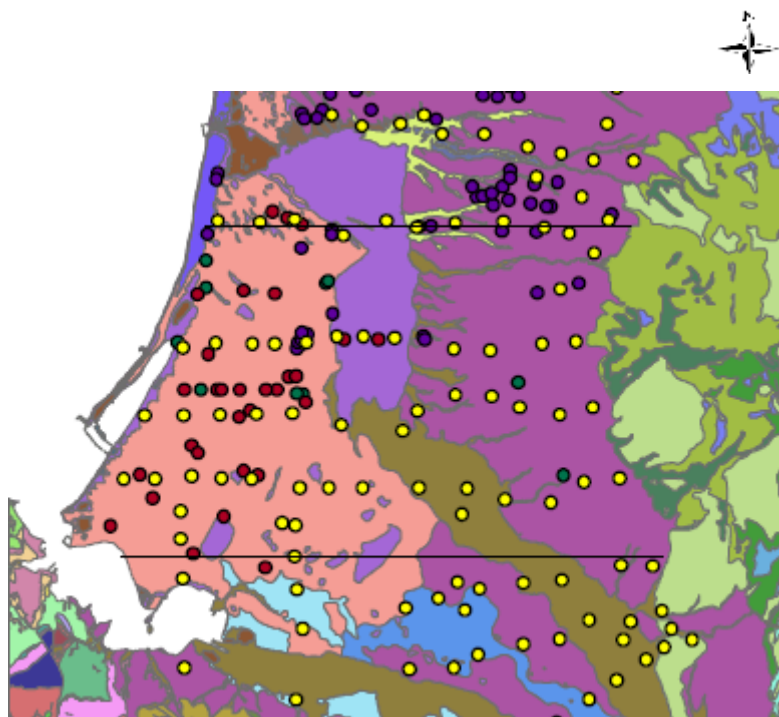
L'area ad Est del Sassu nella zona ad esso adiacente è costituita in prevalenza da sabbie, limo ed argille; procedendo verso Est troviamo invece ghiaie alluvionali, sabbie e subordinatamente argille; è interessante osservare che in una stratigrafia in zona Marrubiu risultano presenti blocchi di trachite con subordinata argilla fino a 41 m e poi trachite leggermente fessurata con passaggi d' acqua: siamo alle pendici del monte Arci, zona di ricarica dell'acquifero superficiale, come dimostrano le isopieze (figura 4.5).

Nella zona compresa tra il Sassu ed il monte Arci sono presenti sabbie grosse talora con passaggi d'acqua da 4 m a 17 m di profondità, poi argille spesso compatte. Procedendo verso l'Arci predominano le ghiaie, ma già a partire dai 10-17 m i valori di resistività sono tipici del limo argilloso e dell'argilla; a profondità superiori agli 80-100 m si troverebbero invece le vulcaniti del monte Arci, che essendo impermeabili spingerebbero la falda freatica verso l'alto.

La zona a ridosso dell'Arci, in base ai valori di resistività, presenterebbe in superficie il complesso ghiaioso e subordinatamente sabbio-argilloso, per poi passare a limo ed argilla e, al di sotto dei 109 m, le vulcaniti. Questa zona è molto interessante perché è attraversata dal rio Mogoro: prima della bonifica tale fiume attraversava le pianure di Terralba e Marrubiu per sfociare poi nello stagno di Sassu, che veniva inoltre alimentato dalle acque provenienti dalle falde del versante occidentale del Monte Arci. Nei periodi di piena le campagne di Terralba, Uras e Marrubiu venivano fortemente danneggiate. Per ovviare a tale problema si decise di deviarlo a valle della linea ferroviaria (in località "Isca de Uras") per essere immesso nel Flumini Mannu e fatto sboccare in mare attraverso gli stagni di San Giovanni e Marceddì; venne perciò realizzato un diversivo lungo 11 km e largo 20 m, ma profondo non più di 5 m. Tale canale non rappresenta un ostacolo per la falda freatica in quanto è meno profondo del letto della stessa, per cui le acque che defluiscono dal monte Arci possono arrivare alla bonifica di Arborea. Ciò si deduce chiaramente osservando il campo di moto dell'acquifero (figura 4.3): le linee di flusso sono dirette verso il mare e gli stagni, come nella parte più a Nord, e le piezometriche presentano orientazione a valle e tendono poi a chiudersi, a causa della presenza di pozzi in pompaggio.

### 7.3 Sezioni geologiche

Una volta effettuati tali studi sono state realizzate due sezioni geologiche lungo i tracciati indicati nella figura 7.3.



1:250.000

**Figura 7.3. Stratigrafie (rosso: Progemisa; verde: Genio Civile Or e ICOS; viola: Laore Sardegna), SEV (giallo) e tracciati lungo i quali sono state realizzate le due sezioni geologiche**

Il primo tracciato si estende per circa 12,5 km, il secondo per circa 16 km.

SONDAGGIO	Longitudine EST (m)	Latitudine NORD (m)	Profondità pozzo/sondaggio (m)	Quota (mslm)
F1	1462048	4406167	66	2
F2	1463258	4406126	192	5
20 Staffa	1463630	4406455	18,65	5,1
27 Staffa	1464050	4406255	26,6	4,1
G14	1464266	4406227	34	1
26 Staffa	1464475	4406075	16,7	5,2
P26 Ar	1465337	4405916	35,8	3,6
P37 Ar	1465344	4405774	41,5	3,2
G15	1465678	4405743	395	7
G16	1466908	4406167	391	2
G17	1467775	4405985	323	2
P41 Ar	1467837	4406017	50	7
P36 Ar	1468195	4406030		6,2
G18	1468904	4406106	322	11
P8 Ma	1470220	4405888	143	27
G19	1470276	4406147	639	27
P3 Ma	1471223	4405866	176,5	37,5
G20	1471465	4405985	461	45
G21	1472171	4405824	1368	58
G23	1473298	4406193	245	102
P9 Ma	1473393	4406367	136	99,8

**Figura 7.4. SEV e stratigrafie del primo tracciato**

Sondaggio	Longitudine Est (m)	Latitudine Nord (m)	Profondità pozzo/sondaggio (m)	Quota (mslm)
23 Staffa	1458970	4397390	11	2,4
H7	1460982	4397001	588	3
24 Staffa	1461330	4396585	8	4,3
12 Staffa	1462230	4397660	4,7	7
25 Staffa	1463415	4396175	5,5	8,2
J11 bis	1463903	4397471	70	7
J12	1464258	4396500	398	7
J11	1464277	4397415	343	8
J15	1467450	4395025	256	18,1
J16	1468403	4395286	1034	8
J17	1468963	4395753	651	10
J22	1469168	4394950	1047	10
J18	1469597	4395566	409	11
J19	1470848	4395734	564	11
J20	1471968	4395828	365	12
J21	1473649	4396239	293	25
K1	1474564	4396226	672	32

**Figura 7.5. SEV e stratigrafie del secondo tracciato**

I due tracciati sono stati implementati nel software AutoCAD 2013, dove sono stati creati i due profili, sui quali sono state disegnate sezioni su carta; successivamente sono state informatizzate con il software Adobe Illustrator Artwork13.0. Nell'Allegato III sono riportati i database relativi ai SEV ed alle stratigrafie dei due tracciati.

Le sezioni ottenute sono riportate nelle figure seguenti. I contatti fra le diverse formazioni possono risultare poco realistici in quanto è stata usata una scala differente per le profondità (1:5.000) e per le lunghezze (1:25.000), essendo queste ultime parecchi ordini di grandezza superiori alle prime, per cui, usando la stessa scala, non sarebbe stato possibile realizzare le sezioni.

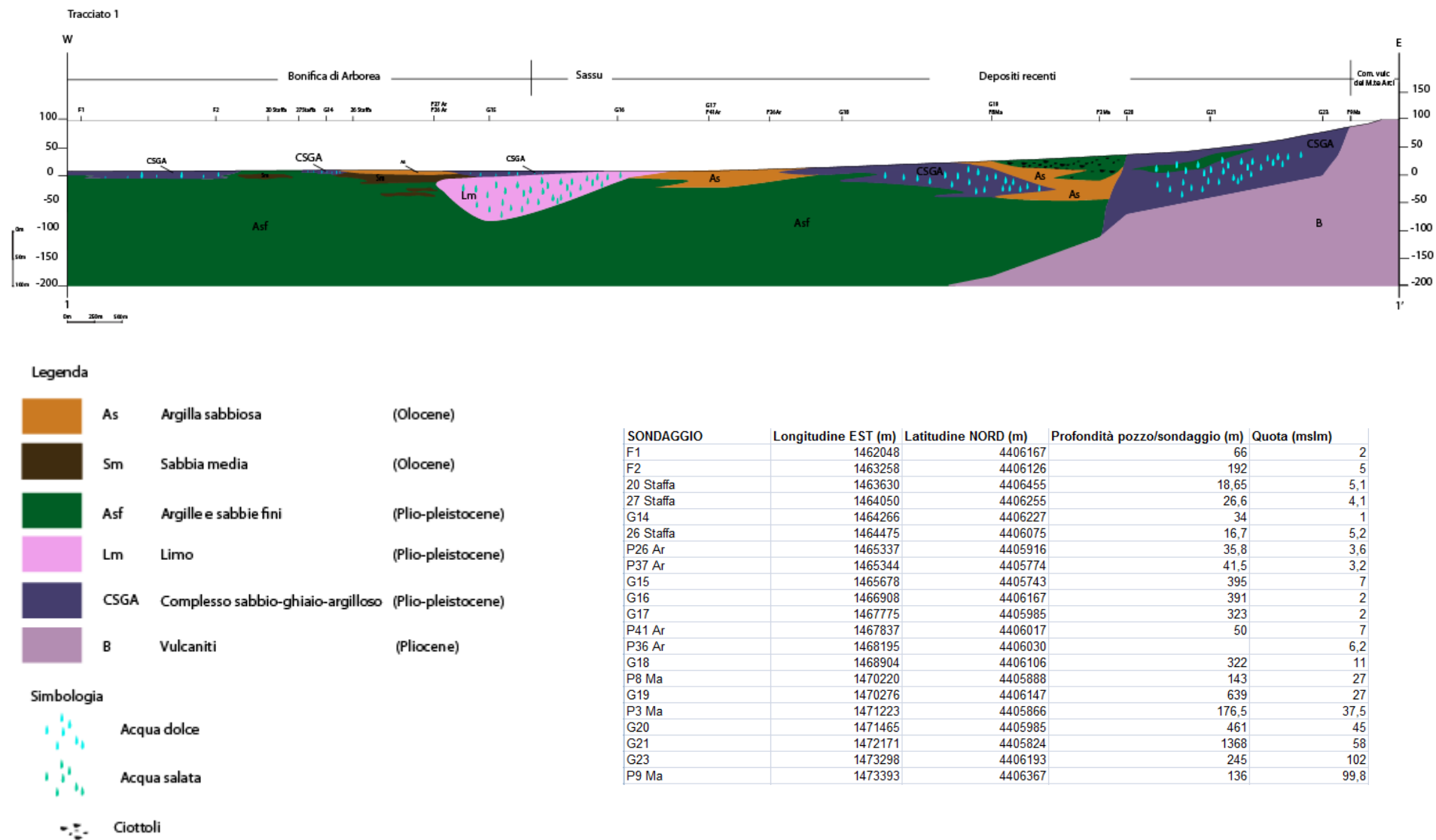
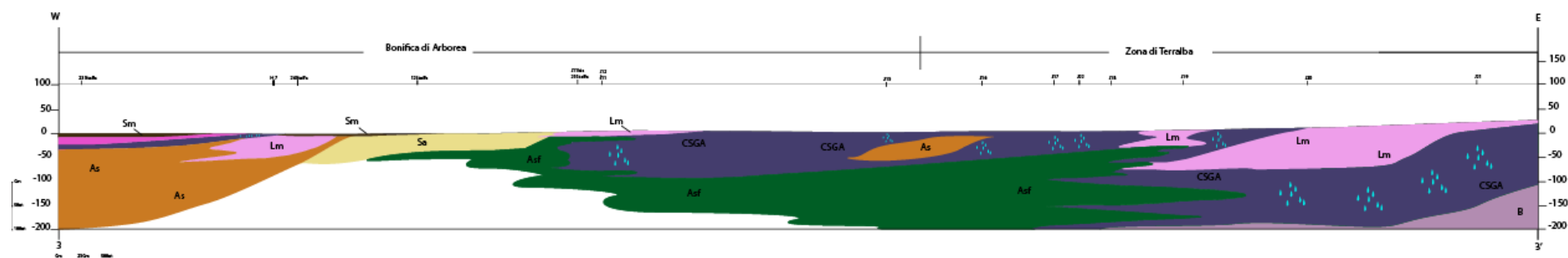


Figura 7.6. Sezione 1. Nella tabella sono riportati i SEV e le stratigrafie con le coordinate, le profondità e le quote



#### Legenda

Sa	Sabbia argillosa	(Olocene)
As	Argilla sabbiosa	(Olocene)
Sm	Sabbia media	(Olocene)
Asf	Argille e sabbie fini	(Plio-pleistocene)
La	Limo argilloso	(Plio-pleistocene)
Lm	Limo	(Plio-pleistocene)
CSGA	Complesso sabbio-ghiaio-argilloso	(Plio-pleistocene)
B	Vulcaniti	(Pliocene)

#### Simbologia

	Acqua dolce
	Acqua salata
	Ciottoli

Sondaggio	Longitudine Est (m)	Latitudine Nord (m)	Profondità pozzo/sondaggio (m)	Quota (mslm)
23 Staffa	1458970	4397390	11	2,4
H7	1460982	4397001	588	3
24 Staffa	1461330	4396585	8	4,3
12 Staffa	1462230	4397660	4,7	7
25 Staffa	1463415	4396175	5,5	8,2
J11 bis	1463903	4397471	70	7
J12	1464258	4396500	398	7
J11	1464277	4397415	343	8
J15	1467450	4395025	256	18,1
J16	1468403	4395286	1034	8
J17	1468963	4395753	651	10
J22	1469168	4394950	1047	10
J18	1469597	4395566	409	11
J19	1470848	4395734	564	11
J20	1471968	4395828	365	12
J21	1473649	4396239	293	25
K1	1474564	4396226	672	32

Figura 7.7. Sezione 2. Nella tabella sono riportati i SEV e le stratigrafie con le coordinate, le profondità e le quote

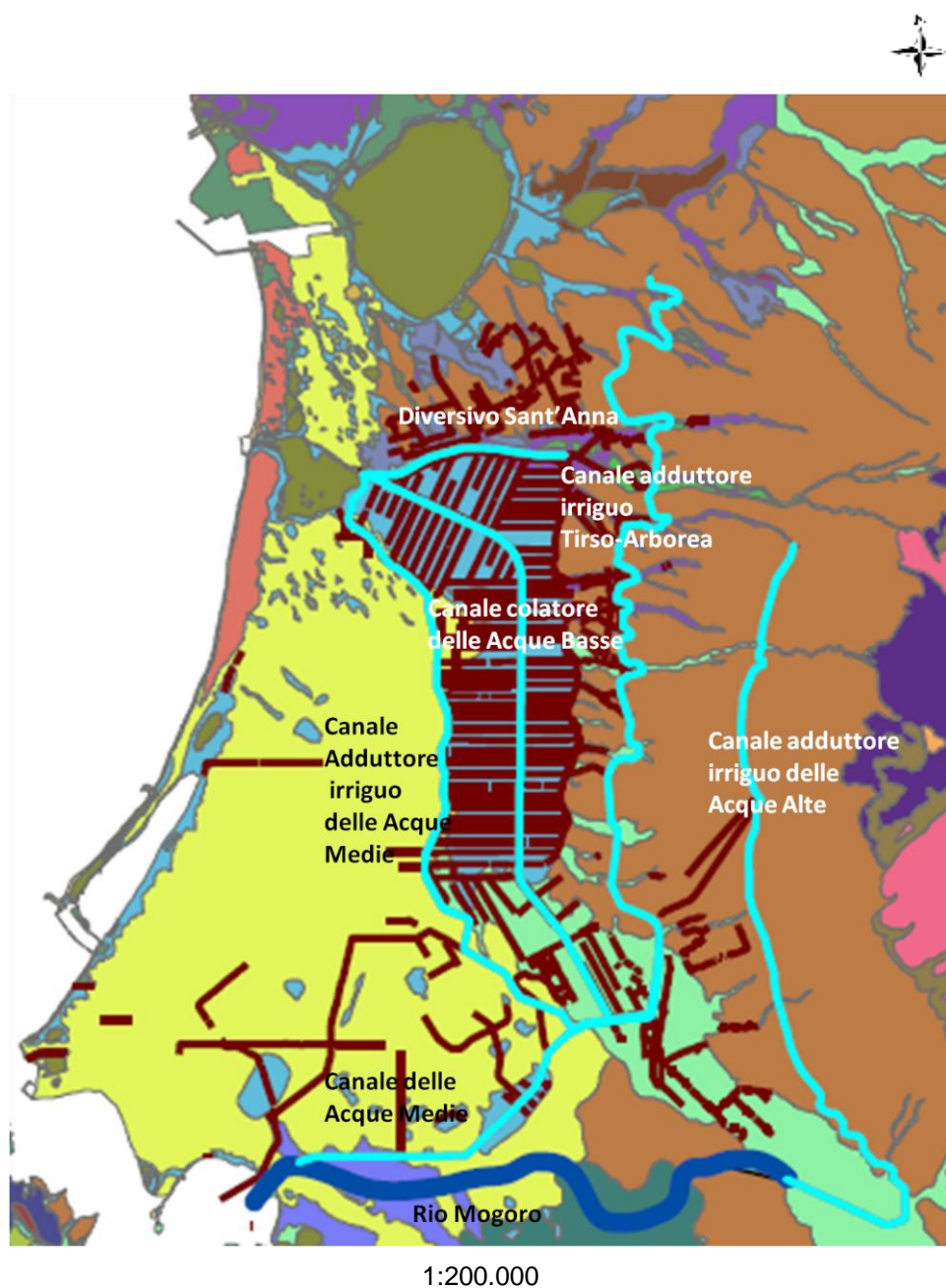


Dall'Oligocene superiore al Miocene inferiore-medio l'area è stata interessata da un intenso vulcanismo a carattere alcalicalcico prevalente; in concomitanza con l'ultima fase distensiva del Campidano (Pliocene medio-superiore) sono affiorate le vulcaniti del Monte Arci, visibili in entrambe le sezioni, in particolare nella prima, che arriva fino alle pendici del suddetto monte (Sanna, 1996). Le sabbie miste a silt ed argille lagunari sono sicuramente le formazioni dominanti, in particolare nella sezione 1; le argille lacustri, distribuite negli ex stagni e nelle zone depresse, sono potenti da qualche metro ad una decina di metri nell'ex Sassu, la loro deposizione, iniziata nel Versiliano, continua tuttora, e lo spessore del ricoprimento cresce dai limiti al centro. In affioramento nella zona interessata dalla prima sezione vi sono argilla sabbiosa, ancora argilla e sabbie fini, limo, ed il complesso sabbio-ghiaio-argilloso, a tratti imbevuto (come attestano i valori di resistività, che si aggirano intorno ai 15-115  $\Omega\cdot m$ ). In particolare si suppone che il limo contenga acqua salata, perchè i SEV registrano valori pari a circa 0,9-2,2  $\Omega\cdot m$ , quindi molto bassi, tipici di materiale altamente conduttivo come appunto l'acqua salata; del resto ciò non dovrebbe stupire in quanto nel Pliocene inferiore c'è stata un'ingressione marina. La seconda sezione interessa un'area più a Sud, qui predominano sabbia media e limo argilloso nella porzione più ad Ovest, quindi vicino al mare, e il complesso sabbio-argilloso imbevuto con acqua salata (compresa fra 4 e 15  $\Omega\cdot m$ ). Nella prima parte del tracciato 2 purtroppo non si avevano abbastanza informazioni e le interpretazioni si sono fermate ad una profondità di circa 50-80 m; proseguendo verso Est in superficie affiora il complesso sabbio-ghiaio-argilloso a tratti imbevuto, con lenti di argilla sabbiosa e limo ( $\rho$  compresa fra 3 e 22  $\Omega\cdot m$ ), e poi argille e sabbie fini in eteropia di facies con il suddetto complesso e con il limo. A profondità superiori ai 100 m sono presenti le vulcaniti (la resistività si aggira intorno ai 30  $\Omega\cdot m$ ).

#### **7.4 Interpretazioni idrogeologiche**

Alla luce di quanto detto finora, è possibile definire i limiti dell'acquifero superficiale nell'area costiera di Arborea; esso interessa, da Est verso Ovest, l'area compresa fra le pendici del Monte Arci ed il mare che bagna la fascia costiera. Le precipitazioni efficaci (e, secondariamente, l'irrigazione) sono le principali fonti di alimentazione: tali acque si infiltrano principalmente tra vulcaniti derivanti dallo smantellamento del Monte Arci, ad Est di Sant'Anna, e le coltri alluvionali che ad esse si poggiano; quindi l'acqua di falda segue una direzione Est-Ovest, e tale flusso si interrompe solo in corrispondenza dell'ex stagno

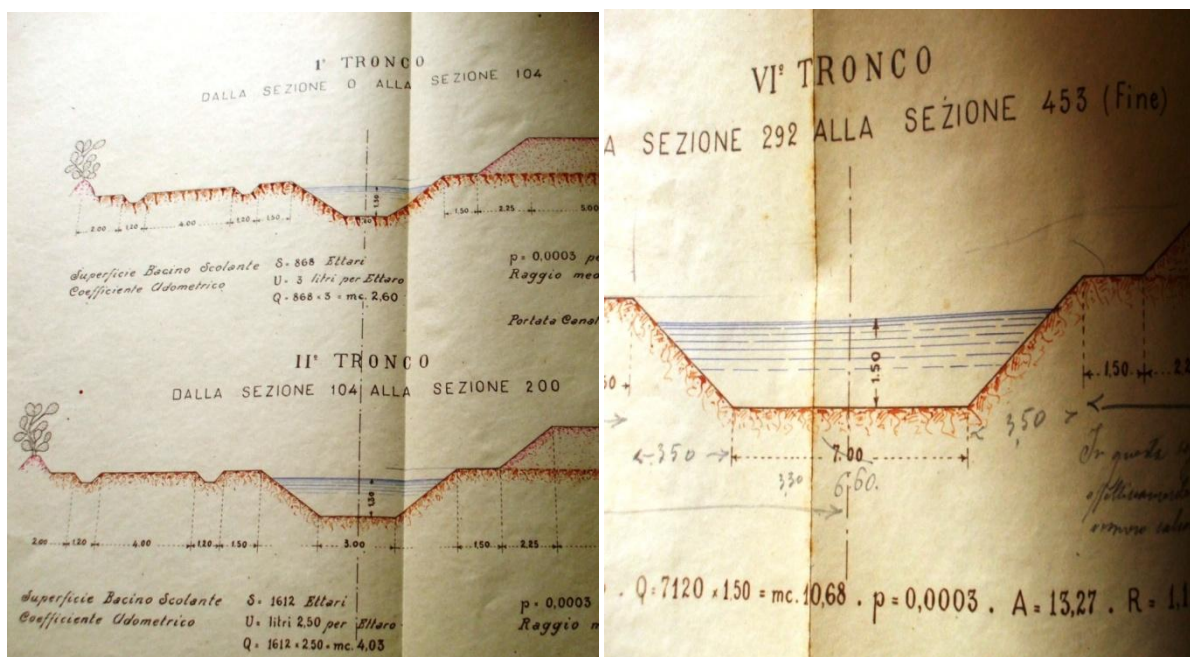
di Sassu, un banco argilloso-limoso di spessore variabile fra 10 e 40 m. Procedendo da Nord verso Est in senso antiorario i limiti del bacino idrogeologico sono rappresentati dallo Stagno di S'Ena Arrubia, dal mare e dagli stagni di Marceddi e San Giovanni. Da questo punto in poi la Bonifica di Arborea è attraversata da una fitta rete di canali che potrebbero influenzare il flusso dell'acqua di falda; per verificare ciò sono stati analizzati i progetti relativi alla realizzazione di tali canali.



**Figura 7.8. Canali principali**

Dei sette canali, ampiamente descritti nel capitolo 1, quelli che potrebbero interferire con il flusso dell'acqua di falda sono il canale delle Acque Medie e il Rio Mogoro nella parte in cui è stato cementificato.

Il canale delle Acque Medie separa la Bonifica di Arborea dall'ex Stagno di Sassu; si tratta di un canale adduttore per uso irriguo che, dalla stazione di sollevamento di Marrubiu, convoglia ad Arborea le acque della diga sul Tirso, che sono a loro volta trasportate dal canale adduttore Tirso-Arborea, al quale il canale delle Acque Medie è collegato tramite canali secondari. Inoltre esso intercetta i corsi d'acqua minori provenienti dal versante occidentale del monte Arci, che in origine alimentavano lo stagno di Sassu, si immette nel rio Mogoro in prossimità degli abitati di Uras e Terralba e convoglia le acque così raccolte negli stagni di San Giovanni e Marceddì.



**Figura 7.9. Progetto Esecutivo del III lotto. Allacciante Acque Medie. Variante al tracciato. Per gentile concessione della Società Bonifiche Sarde**

La massima profondità del canale è 2,50 m, la quota è compresa fra 3 e 5,2 mslm, e in questa zona la falda ha un letto compreso fra 6 e 13 m, quindi il canale non lo intercetta.

Il Rio Mogoro è stato cementificato in località Isca de Uras, per poter essere deviato e fatto sboccare in mare attraverso gli stagni di San Giovanni e Marceddì; è lungo 11 km e largo 20 m, ma profondo non più di 5 m.



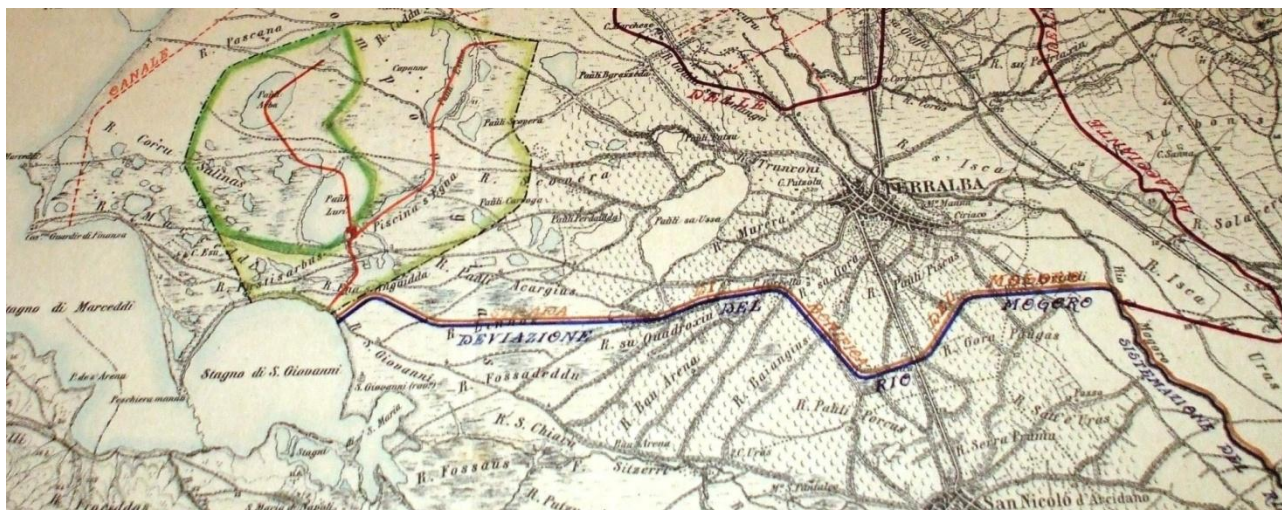


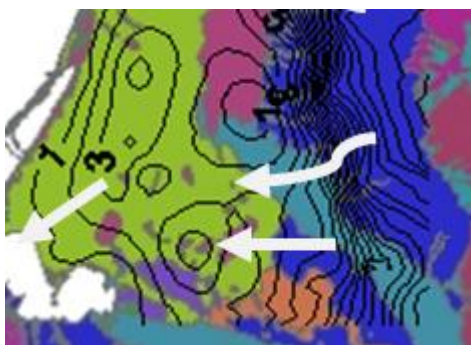
Figura 7.10. Secondo tronco del Rio Mogoro cementificato. Per gentile concessione della Società Bonifiche Sarde



Figura 7.11. Sistemazione del Rio Mogoro. Sezioni idriche. Scala 1:200. Per gentile concessione della Società Bonifiche Sarde

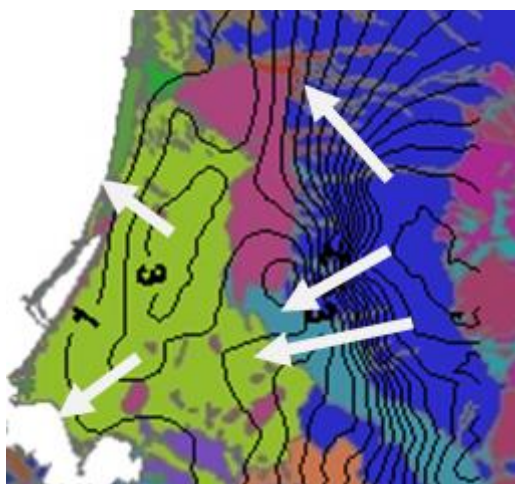
La massima profondità del canale è 4,90 m, la quota è compresa fra 8 e 32 mslm, e in questa zona la falda ha un letto compreso fra 5,2 e 14,5 m, quindi il canale non lo intercetta né ostacola il flusso delle acque.

Quanto osservato dai progetti dei canali è confermato dallo studio del campo di moto dell'acquifero: infatti in corrispondenza del rio Mogoro cementificato le linee di flusso sono dirette verso il mare e gli stagni, come nella parte più a Nord, le piezometriche presentano orientazione a valle e tendono poi a chiudersi a causa della presenza di pozzi in pompaggio (figura 7.12).



**Figura 7.12. Isopiezometriche e linee di flusso in corrispondenza del Rio Mogoro**

In corrispondenza del Sassu le isopiezometriche si dispongono parallelamente e aumenta il gradiente, ossia l'acclività del profilo piezometrico; nella bonifica di Arborea invece la spaziatura è pressoché costante, il gradiente diminuisce verso il mare e le linee di flusso indicano una chiara direzione del moto delle acque da Est verso Ovest e da Sud verso Nord (cioè verso il mare e gli stagni). Ciò indica chiaramente come l'unico ostacolo al flusso sia rappresentato dall'area dell'ex Stagno di Sassu.



**Figura 7.13. Isopiezometriche e linee di flusso in corrispondenza dell'ex Stagno di Sassu**

Da quanto fin qui osservato si può concludere che i canali non rappresentano un ostacolo al flusso delle acque di falda, né isolano l'acquifero superficiale nella Bonifica di Arborea; esso risulta infatti alimentato dalle acque provenienti dal Monte Arci in tutta la zona compresa fra l'ex Stagno di Sassu (escluso) ed il Rio Mogoro cementificato, come dimostra lo studio del campo di moto (Capitolo 4).

## CAPITOLO 8

### Conclusioni

Il presente studio ha permesso di conoscere ed approfondire alcuni aspetti relativi all'acquifero superficiale del Campidano centro-settentrionale, in particolare per quanto riguarda la parte che interessa la Bonifica di Arborea. Si è pensato di affrontare il problema dell'inquinamento da nitrati, e i risultati ottenuti hanno confermato quanto si sospettava, ossia che le concentrazioni di tale inquinante nelle acque sotterranee superano di gran lunga quelle previste dai limiti di legge. Il "problema nitrati" ne ha evidenziato un altro, ossia l'estrema complessità dell'area dal punto di vista stratigrafico e geologico, si è perciò studiato approfonditamente questo aspetto con l'ausilio di SEV e stratigrafie, nonché materiale bibliografico. Questa fase è durata buona parte del periodo di ricerca, e grazie a queste interpretazioni si è arrivati ad identificare i limiti idrostrutturali dell'acquifero superficiale. Tali limiti sono rappresentati dallo Stagno di S'Ena Arrubia a Nord, dal mare ad Ovest, dagli stagni di Marceddì e San Giovanni a Sud e dall'ex Stagno di Sassu a Nord-Est; nella porzione centro-orientale la falda non è isolata e riceve le acque meteoriche provenienti dal Monte Arci, a Sud-Est il canale del Rio Mogoro cementificato non ha profondità tale da intercettare il letto dell'acquifero, quindi anche in questa zona esso riceve le acque provenienti dall'Arci. L'analisi delle stratigrafie e dei SEV ha messo in evidenza che la profondità del letto diminuisce da Nord a Sud da circa 15 m a circa 5-8 m, e da Ovest verso Est varia mediamente da valori intorno ai 4-8 m in prossimità della fascia costiera, più elevati nel centro della Bonifica (6-15 m) e più bassi nella parte orientale (3-6 m).

Ai fini di una buona caratterizzazione idrogeologica dell'area è stato studiato il campo di moto dell'acquifero superficiale, ed è risultato che il flusso ha direzione prevalente Est-Ovest, verso il mare e la peschiera di Corru s'Ittiri, altri corpi recettori sono lo Stagno di S'Ena Arrubia, lo Stagno di Cabras, gli stagni di Marceddì e San Giovanni. Le acque del settore centro-orientale defluiscono naturalmente verso l'ex Stagno del Sassu, dove generano locali emergenze a contatto con lo strato impermeabile di copertura dell'area. Il Tirso ed il Rio Mogoro drenano l'acquifero, che è invece alimentato dai corsi d'acqua che nascono dal Monte Arci. Il livello della falda è prossimo al livello del mare in quasi tutta la Bonifica di Arborea (si aggira intorno ai 4 mslm), sia per la morfologia della zona, di costa

bassa e pianeggiante, dotata di un limitato gradiente topografico, sia per uno sfruttamento eccessivo dell'acquifero.

I risultati del presente studio sono stati ottenuti prevalentemente grazie all'interpretazione di SEV e stratigrafie. Sia i carotaggi che i sondaggi sono distribuiti in modo disomogeneo, e spesso si sono dovute fare delle ipotesi riguardo la geologia di zone per le quali non si avevano informazioni, ciò ha sicuramente un certo margine di errore, e in tal senso fondamentale è la distanza fra SEV e stratigrafia (nello specifico si avevano distanze di circa 500 m e talvolta perfino 2000 m). L'errore è tanto maggiore nei casi in cui si dispone di soli sondaggi elettrici. Infatti, si ricorda che il risultato finale a cui si giunge con i SEV è una colonna di resistività, per la quale ad ogni valore di  $\rho$  corrisponde un'interpretazione litologica. Questa fase è molto delicata perché spesso la resistività varia anche del 30% all'interno di una singola formazione. Inoltre è possibile che le interfacce elettriche non siano limiti geologici: può trattarsi della falda freatica o di brusche variazioni nella salinità o nel contenuto di argilla; d'altra parte, un limite geologico può non essere riconoscibile se separa strati con scarso contrasto elettrico. L'interpretazione geologica deve quindi basarsi su una sicura conoscenza della geologia dell'area in esame quale viene fornita dalle stratigrafie.



## **Bibliografia**

Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente della Sardegna-ARPAS, 2009. Programma d'azione per la Zona Vulnerabile da Nitrati di Origine Agricola. Piano di monitoraggio e controllo (Attività 2007-2008).

Balia R., Ardaù F., Barrocu G., Gavaudò E., Ranieri G., 2009. Assessment of the Capoterra coastal plain (southern Sardinia, Italy) by means of hydrogeological and geophysical studies. *Hydrogeology journal*, 17, pp.981-997.

Balia R., Carrozzo M.T., Loddo M., Luzio D., Margiotta C., Quarta T., Trudu R., 1989. Carta Gravimetrica della Sardegna. Isoanomale secondo Bouguer. Scala 1:500.000.

Balia R., Ciminale M., Loddo M., Patella D., Pecorini G., Tramacere A., 1990. Geophysical study of the Fordongianus geothermal area (Sardinia island, Italy). *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, vol. XXXIII, n.126, pp.129-140

Balia R., Gavaudò E., Ardaù F., Ghiglieri G., 2003. Geophysical approach to the environmental study of a coastal plain. *Geophysics*, vol. 68, n.5 , pp. 1446-1459

Barletta R., 2007. Caratterizzazione idrogeologica del Borro del Giglio (Montevarchi) attraverso indagini geofisiche. Tesi di Laurea in Geotecnologie. Centro di Geotecnologie. Facoltà di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali. Università degli Studi di Siena. A.A. 2006/2007.

Barrocu G., Cau P., Soddu S., Uras G., 2004. Predicting groundwater salinity changes in the coastal aquifer of Arborea (central – western Sardinia). 18 SWIM. Cartagena 2004, Spain. (Ed. Araguás, Custodio and Manzano). IGME

Barrocu G., Soddu S., 2006. Saltwater intrusion in the Arborea area (central-western Sardinia) Proceedings 1st SWIM-SWICA Joint Saltwater Intrusion Conference, Cagliari-

Chia Laguna, Italy-September 24-29, 2006

Belghazal H., 2008. Apport de la méthode géoélectrique à la reconnaissance des réservoirs hydrogéologiques dans la région d'El Hajeb (Causse Moyen Atlasique, Maroc). Filière Master: "Géoressources et Milieu Naturel". Faculté des Sciences. Université Abdelmalek Essaâdi

Bonaventura L., 2007. Metodi di interpolazione geostatistica per dati categorici:teoria e simulazioni. Tesi di laurea in Ingegneria Matematica, Politecnico di Milano. A.A. 2006/2007

Bottacchi M.C., Mantovani F.,2009. Principi di fisica per la geoelettrica. Materiale didattico. Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, sezione di Ferrara. Disponibile su:  
[www.fe.infn.it/u/mantovani/CV/Proceedings/Bottacchi\\_09b.pdf](http://www.fe.infn.it/u/mantovani/CV/Proceedings/Bottacchi_09b.pdf)

Brangi M.L., Mannai C., Testa M., Uras G., 2010. Assessment of groundwater vulnerability to nitrate contamination in the surficial aquifer of the Rio Cixerri plain (south Sardinia, Italy). In: Italian Journal of Engineering Geology and Environment, 1 (2010) 23-33

Capelli G., Mazza R., 2009. Carte idrogeologiche regionali in Italia. In: Italian Journal of Engineering Geology and Environment, 1 (2009) 53-68

Capraro L., 1977. Materiali per la ricostruzione della condizione contadina ad Arborea. Documenti e memorie. Tesi di laurea in Lettere. Facoltà di Lettere e Filosofia, Università degli Studi di Cagliari. A.A. 1976/1977

Carta geologica d'Italia. Fogli 216/217-Capo San Marco-Oristano. Scala 1:100000

Cau P., Lecca G., Muscas L., Barrocu G., Uras G., 2001. Integrazione GIS e software modellistici per l'analisi di vulnerabilità dell'acquifero della piana di Oristano (Sardegna). In: *Atti della Terza Conferenza MondoGIS. Usi e costumi dell'informazione geografica*, Roma, 23-25 maggio 2001

Cherchi A., Marini A. e Murru M., 1978. Dati preliminari sulla neotettonica dei Fogli 216-217 (Capo S.Marco-Oristano), 226 (Mandas), 234-240 (Cagliari-S.Efisio), 235 (Villasimius) (Sardegna). Da: Contributi preliminari alla realizzazione della Carta Neotettonica d'Italia, Pubbl. n. 155 del Progetto Finalizzato Geodinamica, Sottoprogetto Neotettonica, CNR. Officine Grafiche Napoletane, F.Giannini & Figli

Cilento A., 2007. Metodi di interpolazione geostatistica per dati categorici: teoria e simulazioni. Tesi di laurea in Ingegneria Matematica. Facoltà di Ingegneria dei Sistemi. Politecnico di Milano. A.A. 2006/2007

Ciotoli G., Finoia M.G., 2005. Dalla Statistica alla Geostatistica. Introduzione all'analisi dei dati geologici e ambientali. Aracne editrice. Roma, 2005.

Civita M., 2001. *Aspetti metodologici nella realizzazione delle Carte di Vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento*. In: Le risorse idriche sotterranee: conoscerle per proteggerle, Venezia, 14-15 novembre 2001. Disponibile su:  
[www2.difesa-suolo.provincia.venezia.it/.../atti%20convegno%20risorse%20](http://www2.difesa-suolo.provincia.venezia.it/.../atti%20convegno%20risorse%20)

Civita M., 2005. Idrogeologia applicata e ambientale. Casa Editrice Ambrosiana, Milano.

Commissione Europea, Direzione Generale per l'Ambiente, 2002. Attuazione della direttiva 91/676/CEE del Consiglio relativa alla protezione delle acque dall'inquinamento provocato dai nitrati provenienti da fonti agricole. Sintesi delle relazioni trasmesse dagli stati membri per il 2000. Lussemburgo. Disponibile su:

[http://bookshop.europa.eu/it/attuazione-della-direttiva-91-676-cee-del-consiglio-relativa-alla-protezione-delle-acque-dall-inquinamento-provocato-dai-nitrati-provenienti-da-fonti-agricole-pbKH4302098/downloads/KH-43-02-098-IT-C/KH4302098ITC\\_002.pdf;pgid=y8dIS7GUWMdSR0EAIMEUUsWb0000\\_KzYC3Vq;sid=dMywsyTRTvWwqnW6YoQuFEb0cx-2YGmyar4=?FileName=KH4302098ITC\\_002.pdf&SKU=KH4302098ITC\\_PDF&CatalogueNumber=KH-43-02-098-IT-C](http://bookshop.europa.eu/it/attuazione-della-direttiva-91-676-cee-del-consiglio-relativa-alla-protezione-delle-acque-dall-inquinamento-provocato-dai-nitrati-provenienti-da-fonti-agricole-pbKH4302098/downloads/KH-43-02-098-IT-C/KH4302098ITC_002.pdf;pgid=y8dIS7GUWMdSR0EAIMEUUsWb0000_KzYC3Vq;sid=dMywsyTRTvWwqnW6YoQuFEb0cx-2YGmyar4=?FileName=KH4302098ITC_002.pdf&SKU=KH4302098ITC_PDF&CatalogueNumber=KH-43-02-098-IT-C)

Comune di Arborea, 2008. Piano Urbanistico Comunale. Note illustrative alla cartografia tematica. Criteri s.r.l.

Comune di Marrubiu, 2006. Piano di assestamento dei boschi del Comune di Marrubiu per il decennio 2006-2015. Relazione. Disponibile su:  
[www.comunemarrubiu.it/index.aspx?m=80&f=3&idf=82](http://www.comunemarrubiu.it/index.aspx?m=80&f=3&idf=82)

Consorzio di Bonifica dell'Oristanese, 2007. La bonifica nel comprensorio di Terralba-Arborea. In: Piano di classifica per il riparto delle spese consortili. Disponibile su:  
[http://www.bonificaoristanese.it/dmdocuments/pcr.html#\\_Toc179957568](http://www.bonificaoristanese.it/dmdocuments/pcr.html#_Toc179957568)

Conti P., 2008. Carte e Sezioni Geologiche. Centro di Geotecnologie, Università degli Studi di Siena. Disponibile su:  
[http://issuu.com/geotecnologie/docs/carte-e-sezione-geologiche\\_a-colori\\_online](http://issuu.com/geotecnologie/docs/carte-e-sezione-geologiche_a-colori_online)

Criteri, 2008. Comune di Arborea. Piano Urbanistico Comunale. Relazione agronomica. Disponibile su:  
[www.comune.arborea.oristano.it/index.aspx?m=81&f=3&idf=649](http://www.comune.arborea.oristano.it/index.aspx?m=81&f=3&idf=649)

Elmi C., Diretto M., 1996. Geologia. Lezioni per il Corso di Laurea in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio. Pitagora Editrice Bologna.

Fagioli M.T., 2008. Linee guida di idrogeologia: approccio ai progetti. Disponibile su:  
[www.geologitoscana.net/.../2008/.../IdroGeo\\_Supplemento-73.pdf](http://www.geologitoscana.net/.../2008/.../IdroGeo_Supplemento-73.pdf)

Fileccia A., 2011. Le carte piezometriche (Teoria e pratica nella costruzione ed interpretazione). Acque sotterranee (Geograph, Milano), 2011, n.125

Galiano I.C., Mannai C., Matzeu A., Uras G., 2014. Numerical flow and transport models for simulating current and predicted nitrate contamination in groundwater in the Bonifica di Arborea area (W. Sardinia, Italy). In: Engineering Geology for Society and Territory, volume 3, 2015, 211-214

Gargani G., 2008. Linee guida di idrogeologia: approccio ai progetti. I metodi geofisici a supporto dell'idrogeologia. Giornata di studio, Firenze, 9 dicembre 2008. Disponibile su: [www.geologitoscana.net/DocumentazioneOGT/2008/Corsi/.../Gargani.pdf](http://www.geologitoscana.net/DocumentazioneOGT/2008/Corsi/.../Gargani.pdf).

Gervasio I., 2011. Caratterizzazione di sito per la gestione delle risorse idriche sotterranee mediante metodi geofisici integrati. Tesi di Dottorato di Ricerca in Ingegneria Civile ed Ambientale, indirizzo Ambiente e Georisorse, XXIV ciclo. Università degli Studi di Trieste. A.A. 2010/2011. Disponibile su: [https://www.openstarts.units.it/dspace/bitstream/.../1/Gervasio\\_phd.pdf](https://www.openstarts.units.it/dspace/bitstream/.../1/Gervasio_phd.pdf)

Gestion du Risque Nitrates pour une agriculture durable en Méditerranée - GRINMED, 2010. Linee guida sulle buone pratiche per la gestione dei nitrati in agricoltura. Disponibile su: [http://www.agrinnovazione.regione.sicilia.it/agricoltura\\_ambiente/pubblicazioni/manuale\\_buone\\_pratiche\\_italiano.pdf](http://www.agrinnovazione.regione.sicilia.it/agricoltura_ambiente/pubblicazioni/manuale_buone_pratiche_italiano.pdf)

Ghiglieri G., Barbieri G., Vernier A., Carletti A., Demurtas N., Pinna R., Pittalis D., 2009. Potential risks of nitrate pollution in aquifers from agricultural practices in the Nurra region, northwestern Sardinia, Italy. In: Journal of Hydrology 379 (2009) 339-350

Iannarelli M.A., Unicchio V.F., Bellino F., 2009. Proteggiamo l'acqua dai nitrati. Cacucci editore, Bari. Disponibile su: [www.codifo.it/uploads/1246427663.pdf](http://www.codifo.it/uploads/1246427663.pdf)

INEA, 2011. Valutazione del rischio di salinizzazione dei suoli e di intrusione marina nelle aree costiere delle regioni meridionali in relazione agli usi irrigui. Disponibile su: <http://dspace.inea.it/handle/inea/445?mode=full>

Jang C.S., Chen S.K., Kuo Y.M., 2012. Applying indicator-based geostatistical approaches to determine potential zones of groundwater recharge based on borehole data. In: Catena 101 (2013) 178–187

Longley P.A., Goodchild M.F., Maguire D.J., Rhind D.W., 2011. Geographic information systems and science. Wiley, 2011

Lorenzetto M., 2003. La concentrazione di inquinanti in pozzi dell'alta padovana: un'analisi mediante il Kriging. Tesi di Laurea in Scienze Statistiche. Corso di Laurea in Scienze Statistiche, Demografiche e Sociali. Università degli Studi di Padova. A.A. 2002/2003. Disponibile su:

[tesi.cab.unipd.it/205/1/Lorenzetto.pdf](http://tesi.cab.unipd.it/205/1/Lorenzetto.pdf)

Mameli P., Piras L., 2010. La città ideale. La metamorfosi delle paludi attraverso le carte dell'archivio della Società Bonifiche Sarde di Arborea. Mostra documentaria. Arborea, 25 settembre-10 ottobre 2010.

Mandaglio M.C., 2013. Dispense del corso di Geologia Applicata. Corso di Laurea in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio. Università Mediterranea di Reggio Calabria. A.A. 2012/2013. Disponibile su:

[http://www.unirc.it/scheda\\_materia\\_ateneo.php?insegnamento=14905](http://www.unirc.it/scheda_materia_ateneo.php?insegnamento=14905)

Marinoni O., 2003 Improving geological models using a combined ordinary-indicator kriging approach. Engineering Geology, 69: 37-45.

Masoni A., Ercoli L., 2010. Azoto nel terreno. In: Riduzione dell'inquinamento delle acque dai nitrati provenienti nell'agricoltura. Felici editore. 211-241. Disponibile su:

[www.indabook.org/d/Alessandro-Masoni-Laura-Ercoli.pdf](http://www.indabook.org/d/Alessandro-Masoni-Laura-Ercoli.pdf)

Materazzi M., 2011. Principi di base di flusso delle acque sotterranee: parte 1. Lezione 5. Disponibile su:

[scienzeambientali.unicam.it/matdid/idrogeologia/lez5.pdf](http://scienzeambientali.unicam.it/matdid/idrogeologia/lez5.pdf)

Matzeu A, Mannai C., 2012. Metodologie di indagine per la valutazione dell'inquinamento da nitrati delle acque sotterranee nel territorio di Arborea ed implementazione di modelli per la determinazione degli interventi atti al miglioramento della qualità del territorio. Progetto Giovani Ricercatori. Maggio 2012

Mazzella A., 2013. Lezioni di Geostatistica. Dispense del corso di Geostatistica.

Merafina P., 2003. Monitoraggio della dinamica dei nitrati nel mezzo insaturo in un'area vulnerabile della provincia di Parma e applicazione del modello di simulazione CropSyst. Tesi di laurea in Scienze Ambientali, Università degli Studi di Parma, A.A. 2002-2003. Disponibile su:

[www.sipeaa.it/tools/CropSyst/Tesi.pdf](http://www.sipeaa.it/tools/CropSyst/Tesi.pdf)

Muzzu M., 2005. Applicazione del metodo GALDIT per la valutazione della vulnerabilità dell'acquifero costiero di Arborea. Tesi di laurea in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio, Università degli Studi di Cagliari, Dipartimento di Ingegneria del Territorio. A.A. 2004/2005

Noti V. , 2011. Geostatistica e interpolazione spaziale. Materiale didattico. Disponibile su:

[http://www.ricercasit.it/public/documenti/Dottorato/Formazione/Geostatistica\\_e\\_learning/Lezione\\_Noti\\_23set2011\\_slide\\_parte\\_c.pdf](http://www.ricercasit.it/public/documenti/Dottorato/Formazione/Geostatistica_e_learning/Lezione_Noti_23set2011_slide_parte_c.pdf)

Padovani L., Trevisan M., 2002. I nitrati di origine agricola nelle acque sotterranee. Un indice parametrico per l'individuazione di aree vulnerabili. Pitagora editore, Bologna. Disponibile su:

[www.aquanet.it/download/files/cd\\_01/7\\_modelli\\_IPNOA.pdf](http://www.aquanet.it/download/files/cd_01/7_modelli_IPNOA.pdf)

Pala A., Pecorini G., Porcu A, Serra S., 1982. Ricerche geotermiche in Sardegna con particolare riferimento al graben del Campidano. Relazione finale sul tema di ricerca: "Studi geologici, idrogeologici e geofisici finalizzati alla ricerca di fluidi caldi nel sottosuolo". CNR, Pisa.

Pau S., 2011. Gli "impianti storici" di sollevamento delle acque nella bonifica integrale di Arborea: idrovore di Luri, Sassu e Principale di Sollevamento. Conoscenza e valorizzazione. Tesi di Laurea in Ingegneria edile architettura. Università degli Studi di Cagliari. A.A. 2010/2011

Penchini D. , 2006. Ricostruzione della superficie piezometrica della falda alluvionale nell'Alta Valle del Tevere. Tesi di Laurea in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio. Facoltà di Ingegneria. Università degli Studi di Perugia. A.A. 2005/2006. Disponibile su:

<http://www.tesionline.it/default/tesi.asp?id=16111>

Provincia di Oristano, 2013. Piano Faunistico Venatorio Provinciale. Parte quarta: Indicazioni per la predisposizione dello Studio per la Valutazione d'Incidenza delle attività previste dal P.F.V.P. sui Siti della Rete Natura 2000 (DPR n. 357/97, art. 5). Disponibile su:

<http://www.provincia.or.it/CanaliTematici/AttivitaProduttive/PFVP/>

Raspa G., 2004. Dispense di Geostatistica Applicata. Corso di Laurea in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio. Facoltà di Ingegneria. Università degli Studi di Roma "La Sapienza". Disponibile su:

[w3.uniroma1.it/geostatistica/Geostatistica/Dispense.pdf](http://w3.uniroma1.it/geostatistica/Geostatistica/Dispense.pdf)

Regione Autonoma della Sardegna, 2005. Deliberazione n. 1/12 del 18.1.2005. Disponibile su:

[https://www.regione.sardegna.it/documenti/1\\_24\\_20050124153157.pdf](https://www.regione.sardegna.it/documenti/1_24_20050124153157.pdf)

Regione Autonoma della Sardegna, 2005. Programma d'azione per la zona vulnerabile da nitrati di origine agricola di Arborea. Disponibile su:

[www.regione.sardegna.it/documenti/1\\_73\\_20060406132059.pdf](http://www.regione.sardegna.it/documenti/1_73_20060406132059.pdf)

Regione Autonoma della Sardegna, 2010. Caratterizzazione, obiettivi e monitoraggio dei corpi idrici sotterranei della Sardegna. Disponibile su:

[https://www.regione.sardegna.it/documenti/1\\_274\\_20110117104345.pdf](https://www.regione.sardegna.it/documenti/1_274_20110117104345.pdf)

Regione Autonoma della Sardegna, 2010. Piano di Gestione del Distretto Idrografico della Sardegna. Relazione generale. Disponibile su:

[https://www.regionesardegna.it/documenti/1\\_41\\_20100714160147.pdf](https://www.regionesardegna.it/documenti/1_41_20100714160147.pdf)

Sacco D., Offi M., De Maio M., Grignani C., 2007. Groundwater Nitrate Contamination Risk Assessment: A Comparison of Parametric Systems and Simulation Modelling. American Journal of Environmental Sciences 3 (3): 117-125, 2007

Salis N., 2005. Caratterizzazione idrogeologica e carta della vulnerabilità intrinseca all'inquinamento dell'acquifero di Oristano, con tecnologie GIS. Tesi di Dottorato di Ricerca



in Ingegneria del Territorio, XVIII ciclo, Università degli Studi di Cagliari, Facoltà di Ingegneria. A.A. 2004/2005.

Sanna A., 1996. Studio idrogeologico della piana di Arborea (Sardegna centro-occidentale). Tesi di laurea in Scienze Geologiche, Università degli Studi di Cagliari, A.A. 1995-1996.

Sappa G., Rossi M., Coviello M.T., 2005. Effetti ambientali del sovrasfruttamento degli acquiferi della Pianura Pontina (Lazio). Aquifer Vulnerability and Risk, 2nd International Workshop. 4th Congress on the Protection and Management of Groundwater. Reggio di Colorno-Parma, 21-22-23 settembre 2005.

Soddu S., 2004. GIS e modellazione numerica dei processi di salinazione della piana costiera di Oristano (Sardegna centro-occidentale). Tesi di Dottorato in Ingegneria del Territorio, XV ciclo, Università degli Studi di Cagliari, Facoltà di Ingegneria. A.A. 2003/2004.

Soldovieri M.G., 2005. Prospezioni geoelettriche: ottimizzazione in acquisizione e ricostruzione 3D per problematiche ambientali e archeologiche. Tesi di Dottorato di Ricerca in Geofisica Applicata, XVII ciclo, Università degli Studi di Napoli Federico II, Facoltà di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali. A.A. 2004/2005. Disponibile su:  
[http://www.fedoa.unina.it/view/by\\_phd/Scienze\\_della\\_Terra/17.html](http://www.fedoa.unina.it/view/by_phd/Scienze_della_Terra/17.html)

Soru M.C., 2000 .Il territorio senza governo. Bonifiche e trasformazioni in Sardegna. In: Meridiana, n.37. Disponibile su:  
[www.rivistameridiana.it/files/Soru,-Il-territorio-senza-governo.pdf](http://www.rivistameridiana.it/files/Soru,-Il-territorio-senza-governo.pdf)

Staffa F., 2003. Studio idrogeologico della piana di Oristano. Tesi di Laurea in Ingegneria Civile Idraulica, Università degli studi di Cagliari, Facoltà di Ingegneria. A.A. 2002/2003.

Strippoli D., 2011. Studio Preliminare Ambientale per la Realizzazione del Pozzo Esplorativo Eleonora 01-Dir - Arborea (OR). Progetto Sargas. Verifica di assoggettabilità VIA.

Attuazione della direttiva 91/676/CEE del Consiglio relativa alla protezione delle acque dall'inquinamento provocato dai nitrati provenienti da fonti agricole. Disponibile su:

[http://ec.europa.eu/environment/water/water-nitrates/pdf/91\\_676\\_eec\\_it.pdf](http://ec.europa.eu/environment/water/water-nitrates/pdf/91_676_eec_it.pdf)

Tangianu S., 2009. Processi di degrado da nitrati delle risorse idriche sotterranee nell'area della Nurra di Alghero (Sardegna Nord-Ovest). Università degli Studi di Sassari. Facoltà di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali. Corso di Laurea in Gestione dell'Ambiente e del Territorio. A.A. 2008-2009.

Teggi, 2008. Caratterizzazione dei suoli. Metodi geofisici. Disponibile su:

<ftp://ftp.ingv.it/pub/nicola.pagliuca/Sismica.../Metodi%20geofisici.pdf>

[www.geo.uniba.it/attachments/article/.../Classif%20Rocce%20Sedim.pdf](http://www.geo.uniba.it/attachments/article/.../Classif%20Rocce%20Sedim.pdf)

Trefiletti P., 2010. Circolazione idrica sotterranea. Appunti delle lezioni del corso di Geologia Applicata. Facoltà di Ingegneria Civile, Ambientale e Territoriale. Politecnico di Milano. Disponibile su:

[www.2wmaps.com/recursos/ZASEMA/idrogeologia.pdf](http://www.2wmaps.com/recursos/ZASEMA/idrogeologia.pdf)

Università degli Studi di Sassari, Facoltà di Agraria. Istituto di Geopedologia e Geologia Applicata, Cassa per il Mezzogiorno, Roma, 1996 - Progetto Speciale n.25/96. Studio organico delle risorse idriche sotterranee della Sardegna - II fase. Campidano. Sondaggi Elettrici Verticali.

Università degli Studi di Sassari, Facoltà di Agraria. Istituto di Geopedologia e Geologia Applicata, Cassa per il Mezzogiorno, Roma, 1996 - Studio organico delle risorse idriche sotterranee della Sardegna - II fase. (Prog. Cassa 25/96). Campidano. Relazione idrogeologica. Prospezioni geoelettriche. Allegato 2/III

Uras G., Testa M., Sodde M., Mulas M.G., 2005. Vulnerability to nitrates of agricultural origin in Sardinia. The Arborea Area. In: Aquifer Vulnerability and Risk, 2<sup>nd</sup> International Workshop. 4<sup>th</sup> Congress on the Protection and Management of Groundwater. Reggio di Colorno-Parma, 21, 22 e 23 Settembre 2005.

Zatelli P., 2009. Sistemi di riferimento. Materiale didattico. Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale. Università degli Studi di Trento. Disponibile su:  
[www.ing.unitn.it/~zatelli/cartografia.../slides/Sistemi\\_di\\_riferimento.pdf](http://www.ing.unitn.it/~zatelli/cartografia.../slides/Sistemi_di_riferimento.pdf)

## **ALLEGATI**

# **Allegato I**

## **Stratigrafie**

## Zona 1

### Quinta linea-zona 1

Stratigrafia	Longitudine Est (m)	Latitudine Nord (m)	Profondità (m)	Strato	Quota (mslm)	Falda
20 Staffa	1463630	4406455	0-1,80	Sabbia media	5,1	4-18,50 m
			1,80-3,40	Sabbia grossa		
			3,40-6,60	Sabbia media		
			6,60-10,80	Sabbia grossolana		
			10,80-13,90	Sabbia media		
			13,90-14,40	Sabbia grossolana		
			14,40-17	Sabbia media		
			17-18,50	Sabbia grossolana		
			18,50-18,65	Argilla compatta		
27 Staffa	1464050	4406255	0-1,50	Sabbia fine	4,1	4,50-25,60 m
			1,50-2,50	Arenaria fine		
			2,50-6,80	Sabbia media e fine		
			6,80-8,30	Argilla compatta e plastica		
			8,30-10,50	Sabbia grossolana sciolta		
			10,50-14,80	S. fine con progress. aumento della matr. argill.		
			14,80-17,90	S. argillosa e a. sabbiosa		
			17,90-24,80	Sabbia media, grossa e fine		
			24,80-26,60	A. sabbiosa con progr. aumento della compattezza		
26 Staffa	1464475	4406075	0-1,80	Argilla a matrice sabbiosa	5,2	4-16,20 m
			1,80-4,50	Sabbia media più o meno compatta		
			4,50-5,50	Sabbia grossolana		
			5,50-7	Sabbia media		
			7-15,50	Sabbia grossolana, fine e media		
			15,50-16,20	Arenaria		
			16,20-16,70	Argilla compatta		
P26 Ar	1465337	4405916	0-31	Alternanza di argilla e argilla sabbiosa	3,592669133	
			31-35,80	Strato ghiaioso (50cm) poi sabbia		
P37 Ar	1465344	4405774	0-5	Sabbia con argilla	3,160756713	
			5-9	Argilla sabbiosa		
			9-16	Sabbia con acqua		
			16-19	Sabbia fine argillosa		
			19-28	Argilla con sabbia		
			28-36	Argilla		
			36-38	Sabbione con acqua		
			38-50	Argilla		

### Sesta linea-zona 1

Stratigrafia	Longitudine Est (m)	Latitudine Nord (m)	Profondità (m)	Strato	Quota (mslm)	Falda
2 Staffa	1462790	4404165	0-1,1	Sabbia media sciolta	4,5	Tra 2 e 7,90 m
			1,1-3,1	Arenaria litica senza matrice asciutta		
			3,1-7	Sabbia fine con grossi inclusi		
			7-7,90	Sabbia grossolana senza matrice		
			7,90-8,30	Argilla prima sabbiosa poi compatta		
3 Staffa	1463695	4404075	0-3,30	Sabbia media a scarsa matrice per lo più sciolta	6,7	Tra 1,50 e 8,30 m
			3,30-8,30	Sabbia media o grossolana, a matrice scarsa o assente, sciolta		
			8,30-8,90	Argilla compatta		
ICOS 1	1465165	4404367	0-1,1	Suolo sabbioso	3	7 m (profondità letto)
			1,1-2,1	Sabbia media mista a limo		
			2,1-3,2	Alternanza di limi, sabbie ed argille		
			3,2-7	Sabbia media mista a limo		
			7-10,3	Limo argilloso con conchiglie di stagno		
			10,3-20	Sabbione quarzoso e sabbia con conchiglie marine		
ICOS 2	1465230	4404437	0-1,8	Suolo sabbioso o sabbioso-limoso	3	6,6 m (profondità letto)
			1,8-3,5	Sabbione quarzoso misto a sabbia e poco limo		
			3,5-6,5	Sabbia quarzosa con poco limo		
			6,5-12	Limo argilloso con conchiglie di stagno		
			12-20	Sabbione quarzoso feldspatico e sabbia con conchiglie marine		

## Settima linea-zona 1

Stratigrafia	Longitudine Est (m)	Latitudine Nord (m)	Profondità (m)	Strato	Quota (mslm)	Falda
4 Staffa	1461790	4402335	0-1	Sabbia media sciolta	3	1,30-4,50 m
			1-1,85	Sabbia grossa a scarsa matrice argillosa		
			1,85-2,35	Sabbia argillosa		
			2,35-3,50	Sabbia fine, media, siltosa		
			3,50-4,50	Sabbia grossolana e media con lenti argillose		
			4,50-5	Argilla compatta		
P14 Ar	1464328	4402503	0-155	Alternanze di sabbie argillose ed argilla	6,86	
			155-159	Sabbia		
P13 Ar	1464452	4402632	0-68	Strati di sabbia argillosa ed argilla con conchi	7,05	
			68-70	Sabbia quarzosa		
			70-102	Alternanza di argilla sabbiosa e sabbia		
			102-107	Argilla		
			107-111	Sabbia a grana grossa		
			111-130	Argilla		
P30 Ar	1464359	4402682	0-6,50	Sabbia gialla	7,38	
			6,50-12	Argilla		
			12-18	Sabbia grigia con ghiaia		
P34 Ar	1464460	4402737	0-2,50	Sabbia rossastra		
			2,50-5	Argilla rossastra		
			5-8	Sabbia bianca con conchiglie		
			8-9	Argilla grigia		
			9-12	Argilla sabbiosa		
P42 Ar	1464470	4402955	0-1,50	Sabbia	7,07	
			1,50-8	Sabbia argillosa		
			8-19	Sabbione		
			19-20	Argilla grigia con conchiglie		
P12 Ar	1464608	4402920	0-2	Sabbia fine	6,3	
			2-25	Sabbia argillosa		
			25-42	Argilla grigia		
			42-66	Argilla sabbiosa		
			66-76	Argilla grigia		
			76-95	Argilla sabbiosa		
			95-102	Argilla grigia		
			102-107	Sabbia fine		
			107-128	Argilla grigia		
			128-130	Ghiaietto e acqua		

## Ottava linea A- zona 1

Stratigrafia	Longitudine Est (m)	Latitudine Nord (m)	Profondità (m)	Strato	Quota (mslm)	Falda
5 Staffa	1461030	4401300	0-2,10	Sabbia media tendente a fine	2,8	1,5-12 m
			2,10-3	Sabbia fine		
			3-5	Alternanza di sabbia fine, media e grossa a scarsa matrice siltosa		
			5-9	Sabbia da media a fine a matrice siltica		
			9-12,50	Aumento della matrice argillosa compatta		
GC 114	1461575	4401300	0-8	Sabbie fini con livelli argilloso-sabbiosi	5	27,5 m (prof. letto acquifero)
			8-17	Argilla scura		
			17-26	Sabbia argillosa		
			26-27,5	Ghiaia e sabbia, acqua		
			27,5-32	Argilla sabbiosa		
			32-34,5	Livello ghiaioso-argilloso-sabbioso, acqua		
			34,5-41	Argilla scura		
			41-45	Argilla marnosa con ciottoli		
			45-49	Sabbia fine limosa con ciottoli		
			49-51	Sabbia grossa e acqua		
			51-60	Argilla scura		
			60-61	Sabbia-acqua		
			61-70	Argilla grigia		
6 Staffa	1462035	4401300	0-1,5	Arenaria litica a matrice argillosa	4	1,5-4,95 m
			1,5-2,9	Sabbia argillosa, da media a grossolana, di colore scuro		
			2,9-4,95	Arenaria a scarsa matrice limo-argillosa e cemento carbonatico		
13 Staffa	1462155	4401300	0-6,40	Alternanza di sabbia media e grossolana a scarsa matrice argillosa	4	1-6,40 m
			6,40-6,50	Argilla compatta		
29 Staffa	1462670	4400520	0-1,30	Sabbia medio-fine	4,7	1,30-7,80 m
			1,30-2,40	Argilla sabbiosa con piccoli noduli carbonatici (letto falda?)		
			2,40-3,50	Sabbia grossolana		
			3,50-7	Sabbia media a scarsa matrice limosa		
			7-7,80	Sabbia argilloso-limosa		
			7,80-8,50	Argilla sabbiosa plastica e compatta		
7 Staffa	1462685	4401300	0-2	Alternanza di sabbie ed argille	4	1-5,40 m
			2-5,40	Sabbia grossolana compatta		
			5,40-5,50	Crostone calcareo		
14 Staffa	1462995	4400710	0-3,65	Sabbia media a scarsa matrice argillosa	6	1,30-5 m
			3,65-5	Argilla sabbiosa compatta a noduli carbonatici		
			5-5,25	Argilla con grossi noduli carbonatici, compatta		

## Ottava linea B- zona 1

Stratigrafia	Longitudine Est (m)	Latitudine Nord (m)	Profondità (m)	Strato	Quota (mslm)	Falda
28 Staffa	1463425	4401310	0-4	Sabbia media a scarsa matrice argillosa e resti di conchiglie	6	3-12,40 m
			4-8	Sabbia grossolana, assenza di matrice, sciolta		
			8-10	Sabbia media sciolta		
			10-12	Sabbia grossolana e fine		
			12-14	Argilla sabbiosa		
			14-16	Sabbia grossolana		
			16-17,5	Sabbia media e fine		
			17,5-18,7	Sabbia grossolana sciolta, assenza di matrice		
			18,7-19,2	Sabbia argillosa a matrice limosa, sciolta		
			19,2-19,5	Argilla compatta		
8 Staffa	1463745	4401310	0-2,75	Sabbia media a matrice argillosa	7,8	3,40-10,40 m
			2,75-6	Sabbia argillosa più o meno compatta		
			6-10,40	Sabbia grossolana a scarsa matrice limo-argillosa, con clasti di arenaria e resti di conchiglie		
			10,40-10,50	Sabbia fine a cemento carbonatico	5	20 m (prof. letto acquifero)
GC 115	1464325	4401200	0-8	Sabbie fini con livelli argilloso-sabbiosi		
			8-16	Argilla scura		
			16-18	Sabbia argillosa		
			18-20	Ghiaia e sabbia, acqua		
			20-24	Argilla sabbiosa scura		
			24-32	Sabbia debolmente limoso-argillosa e acqua		
			32-50	Argilla grigia		
GC 113	1464500	4401175	0-10	Sabbie fini e acqua	5	20 m (prof. letto acquifero)
			10-17	Argilla scura		
			17-20	Argilla sabbiosa e acqua		
			20-30	Argilla limosa nerastra		
			30-46	Argilla nera con resti conchigliari e ciottoli		
			46-49,5	Ciottoli e sabbia		
			49,5-53	Argilla nerastra		
			53-56	Argilla marnoso-sabbiosa		
			56-58	Livello ciottoloso-sabbioso e acqua		
			58-75	Argilla grigia		
			75-80	Argilla marnosa		
			80-93	Argilla nerastra		
			93-97	Ghiaia e acqua		
			97-110	Argilla grigia		
9 Staffa	1464570	4400940	0-3,30	Sabbia fine a scarsa matrice carbonatica, sciolta	5	1,30-6,80 m
			3,30-5,80	Sabbia da media a grossolana, senza matrice, sciolta		
			5,80-6,80	Argilla sabbiosa debolmente compatta		

## Nona linea A- zona 1

Stratigrafia	Longitudine Est (m)	Latitudine Nord (m)	Profondità (m)	Strato	Quota (mslm)	Falda
21 Staffa	1459820	4398880	0-1,20	Sabbia fine a scarsa matrice siltosa, con piccoli noduli carbonatici, debolmente compatta	3,2	1-7,50 m
			1,20-4	Sabbia fine siltosa, satura		
			4-6,20	Sabbia fine siltosa con grossi inclusi di arenaria, a cemento carbonatico		
			6,20-7	Sabbia grossolana sciolta a scarsa matrice limo-argillosa		
			7-7,50	Sabbia da fine a media con matrice limosa		
			7,50-8	Crisotone calcareo, sciolto, asciutto		
30 Staffa	1460180	4398200	0-2,20	Sabbia media	4	2,50-11,30 m (prima)
			2,20-3,30	Sabbia grossolana		17,80-21,60 m (seconda)
			3,30-4,80	Sabbia siltosa sciolta con clasti di arenaria litica		
			4,80-6,80	Sabbia fine limosa sciolta		
			6,80-8,60	Sabbia limosa a matrice argillosa debolmente compatta		
			8,60-11,30	Argilla limosa con resti di conchiglie		
			11,30-15,90	Argilla compatta grigio-scuro		
			15,90-17,60	Argilla sabbiosa compatta		
			17,60-20,80	Sabbia grossolana con resti di conchiglie		
			20,80-21,60	Sabbia media ricca in conchiglie		
			21,60-22,50	Argilla compatta, umida, plastica		
10 Staffa	1461300	4399700	0-1,50	Sabbia media a scarsa matrice limosa, sciolta	4,2	1,50-10,10 m
			1,50-1,90	Sabbia grossolana compatta		
			1,90-3,70	Sabbia sciolta senza matrice, a tratti con resti di apparati radicali		
			3,70-6	Sabbia grossolana a scarsa matrice limosa con inclusi di arenaria litica		
			6-6,50	Sabbia media sciolta, assenza di clasti		
			6,50-8	Sabbia grossolana a matrice limosa		
			8-9	Perdita della carota		
			9-10,10	Argilla sabbiosa plastica debolmente compatta		
			10,10-12,10	Argilla con poca sabbia, compatta e plastica, di colore grigio		
22 Staffa	1461490	4399490	0-2	Sabbia fine sciolta, beige	8,7	5,50-14,0 m
			2-2,70	Sabbia siltosa sciolta, secca		
			2,70-6	Sabbia fine e media sciolta, senza matrice		
			6-8	Sabbia grossolana, assenza di matrice		
			8-9	Sabbia fine a scarsa matrice limosa, sciolta, chiara		
			9-11,50	Sabbia siltosa, grigia, debolmente compatta		
			11,50-13,50	Sabbia limo-argillosa con resti di conchiglie, sciolta, grigia		
			13,50-14,20	Argilla sabbiosa compatta, con livelli di sabbia fine di natura carbonatica		
			14,20-14,50	Argilla compatta, grigia, con gusci di conchiglie		



## Nona linea B- zona 1

Stratigrafia	Longitudine Est (m)	Latitudine Nord (m)	Profondità (m)	Strato	Quota (mslm)	Falda
17 Staffa	1462795	4398975	0-1,50	Sabbia fine a scarsa matrice limosa, debolmente compatta	6,2	1,50-3,30 m
			1,50-2,50	Sabbia medio-fine compatta		
			2,50-3,30	Sabbia siltosa senza matrice, bruno-rossastra		
			3,30-4	Argilla con grossi noduli carbonatici, compatta, plastica, grigio-verde		
11 Staffa	1463200	4398850	0-1,25	Sabbia media a scarsa matrice, bruna	5	0,60-2,45 m
			1,25-1,65	Sabbia grossolana sciolta		
			1,65-2,45	Sabbia media debolmente compatta, di colore grigio chiaro		
			2,45-3	Argilla compatta grigia con resti di conchiglie		

## Zona 2

### Prima linea A- zona 2

Stratigrafia	Longitudine Est (m)	Latitudine Nord (m)	Profondità (m)	Strato	Quota (mslm)	Falda
ICOS6	1464871	4417126	0-3	Materiale da riporto	7,8	16m (prof. acq.)
			3-10,5	Argilla molle leggermente sabbiosa		
			10,5-14,8	Ghiaia e sabbia		
			14,8-16	Sabbia		
			16-18,5	Argilla compatta		
			18,5-20,5	Ghiaia silicea		
ICOS8	1465033	4417158	0-3	Materiale da riporto	10	15m (prof. acq.)
			3-9	Argilla giallastra molle		
			9-10	Conglomerato		
			10-13	Sabbia e ghiaia		
			13-15	Argilla leggermente sabbiosa		
			15-17	Argilla nerastra dura		
			17-18,5	Argilla marrone dura		
			18,5-19,5	Sabbia mista a ghiaia		
ICOS9	1465085	4417374	0-8	Argilla molle	6,5	10,2m (prof. acq.)
			8-10,2	Ghiaia		
			10,2-13,5	Argilla gialla sabbiosa molle		
			13,5-14,2	Ciotoli		
ICOS10	1465123	4417328	0-2,1	Materiale da riporto	7	12,5m (prof. acq.)
			2,1-7,5	Argilla molle		
			7,5-12,5	Ghiaia con sabbia		
ICOS7	1465137	4416881	0-3	Materiale da riporto	10	11,3m (prof. acq.)
			3-6	Argilla molle leggermente sabbiosa		
			6-8,7	Argilla molto molle leggermente sabbiosa		
			8,7-10,5	Arenaria tenera in formazione		
			10,5-11,3	Sabbia e ghiaia con lenti di argilla		
			11,3-17,2	Alternanza di argille di colori diversi		
			17,2-20,3	Sabbia con ghiaia		
P26Or	1466921	4417285	0-10	Conglomerato argilloso		
			10-23	Ghiaia con sabbia in presenza di acqua		
			23-28	Argilla		
			28-29	Sabbia in presenza di acqua		
			29-50	Conglomerato argilloso		

## Prima linea B- zona 2

Stratigrafia	Longitudine Est (m)	Latitudine Nord (m)	Profondità (m)	Strato	Quota (mslm)	Falda
P1Or	1467496	4417015	0-6	Sabbia argillosa		
			6-10	Sabbia grossa con ciottoli senza acqua		
			10-24	Sabbia grossa con ciottoli e acqua		
			24-35	Argilla sabbiosa		
			35-40	Sabbia fine e acqua		
GC84	1470437	4416400	0-9	Sabbie fini a matrice argillosa	14	10m (prof. acq.)
			9-10	Sabbie grossolane e acqua		
			10-11	Sabbie fini a matrice argillosa		
			11-12,50	Sabbie grossolane e acqua		
			12,50-15	Sabbie fini a matrice argillosa		
P2Or	1472555	4416152	0-3	Terreno da riporto		
			3-15	Conglomerato argilloso		
			15-32	Argilla con sabbione e conglomerato		
			32-40	Sabbia e acqua		
			40-72	Sabbia molto argillosa dura e compatta		
			72-79,5	Sabbia e acqua		
P3aOr	1472611	4415389	0-1,80	Terreno vegetale		
			1,80-18,50	Alluvione con ghiaia, argilla e sabbia		
			18,50-33,50	Argilla gialla più o meno sabbiosa		
			33,50-38,50	Sabbia con falda d'acqua		
			38,50-50	Argilla compatta		
			50-59,50	Ghiaia e sabbione con acqua		
			59,50-70	Argilla sabbiosa con alternanze più compatte		
P3Or	1472636	4415417	0-6	Terreno da riporto		
			6-8	Sabbia grossa e acqua		
			8-22	Argilla e sabbia		
			22-33,50	Argilla gialla compatta		
			33,50-36,50	Sabbia e acqua		
			36,50-48	Argilla sabbiosa		
			48-60	Conglomerato argilloso durissimo		
			60-65	Sabbia e acqua		

## Seconda linea A- zona 2

Stratigrafia	Longitudine Est (m)	Latitudine Nord (m)	Profondità (m)	Strato	Quota (mslm)	Falda
P25PA	1472179	4414233	0-7	Sabbione-ghiaia	18,6	
			7-11	Argilla		
			11-19	Sabbione-ghiaia		
			19-28	Argilla-sabbia		
			28-33	Sabbione		
			33-58	Argilla		
			58-66	Ghiaia-sabbia		
			66-87	Argilla		
			87-92	Sabbione		
			92-100	Argilla		
P8Or	1473081	4414484	0-5,50	Conglomerato argilloso, fra 1 e 2,50 m argilla gialla		
			5,50-7	Ghiaia e sabbia		
			7-8	Conglomerato argilloso		
			8-10,80	Sabbia e ghiaia		
			10,80-20	Argilla gialla		
			20-22	Argilla sabbiosa		
			22-25,50	Conglomerato argilloso		
			25,50-31,50	Argilla gialla		
			31,50-35	Ghiaia e sabbia		
			35-42	Conglomerato argilloso		
			42-45	Ghiaia e sabbia		
			45-50	Conglomerato argilloso		
			50-55	Ghiaia e sabbia		
			55-60	Argilla grigia		

## Seconda linea B- zona 2

Stratigrafia	Longitudine Est (m)	Latitudine Nord (m)	Profondità (m)	Strato	Quota (mslm)	Falda
P9OR	1473449	4414438	0-3	Conglomerato argilloso		
			3-5	Argilla gialla		
			5-6,50	Ghiaia		
			6,50-10	Argilla sabbiosa		
			10-11,50	Ghiaia		
			11,50-15	Conglomerato argilloso		
			15-17	Argilla sabbiosa		
			17-18	Conglomerato argilloso		
			18-21	Sabbia		
			21-27,50	Conglomerato argilloso		
			27,50-32	Argilla grigia e chiara		
			32-40	Conglomerato argilloso		
			40-45	Argilla		
			45-47,50	Argilla sabbiosa		
			47,50-58	Conglomerato duro		
			58-60	Ghiaia e argilla gialla		
P6OR	1474577	4414669	0-4	Terreno vegetale		
			4-18	Argilla gialla e ciottoli		
			18-20	Argilla gialla e sabbia		
			20-21	Passaggio d'acqua		
			21-45	Argilla gialla sabbiosa con qualche ciottolo		
			45-47	Sabbia grossa e acqua		
			47-74	Argilla e sabbia		
			74-76	Sabbia e acqua		
			76-80	Argilla giallastra		

## Terza linea A- zona 2

Stratigrafia	Longitudine Est (m)	Latitudine Nord (m)	Profondità (m)	Strato	Quota (mslm)	Falda
GC43	1467150	4412340	0-1,5	Sabbia quarzosa a matrice siltoso-argillosa	4,5	9m (prof. acq.)
			1,5-6	Argilla gialla		
			6-8	Argilla grigia		
			8-9	Sabbia fine quarzoso-feldspatica a matrice siltosa		
			9-12	Argilla grigio-nerastra		
			12-13	Alluvione ciottolosa a matrice sabbiosa grossolana		
P24SG	1468841	4412454	0-3	Sabbia	8,25	
			3-5	Argilla		
			5-12	Sabbione		
			12-25	Argilla		
			25-28	Sabbione		
			28-37	Argilla sabbiosa		
			37-42	Ghiaia-sabbia		
			42-50	Sabbia-argilla		
			50-54	Ghiaia		
			54-77	Argilla		
			77-81	Sabbione		
			81-90	Argilla-sabbia		
			90-95	Sabbione ghiaioso		
			95-100	Argilla-sabbia		
P14SG	1469990	4411397	0-8	Sabbia fine argillosa		
			8-13	Alluvione con ghiaia, argilla e sabbia		
			13-18	Sabbione con acqua		
			18-20,50	Argilla compatta giallo chiaro		
			20,50-23,50	Sabbione e ghiaia con acqua		
			23,50-35,20	Argilla compatta		
			35,20-45,40	Argilla sabbiosa		
			45,40-58	Argilla compatta grigia		
			58-70	Argilla sabbiosa		

### Terza linea B- zona 2

Stratigrafia	Longitudine Est (m)	Latitudine Nord (m)	Profondità (m)	Strato	Quota (mslm)	Falda
P19PA	1471305	4412911	0-3	Terreno vegetale		
			3-4,10	Argilla		
			4,10-5,70	Sabbia argillosa		
			5,70-7,70	Ghiaia con acqua		
			7,70-8,10	Sabbia argillosa		
			8,10-14,50	Ghiaia-sabbia (pulita) acqua		
			14,50-18,50	Argilla		
			18,50-19,50	Argilla sabbiosa		
			19,50-24	Argilla		
			24-27	Sabbia con acqua (risalita a 4m dal p.c.)		
			27-31	Argilla		
			31-36	Sabbia		
			36-44	Argilla		
			44-46	Sabbia		
			46-48	Argilla		
			48-54	Sabbia		

### Quarta linea A- zona 2

Stratigrafia	Longitudine Est (m)	Latitudine Nord (m)	Profondità (m)	Strato	Quota (mslm)	Falda
P16SG	1464468	4409261	0-5	Sabbia e acqua	4,632	
			5-12	Argilla e sabbia		
			12-13	Sabbia e acqua		
			13-27	Sabbia e argilla		
			27-33	Sabbia, ciottoli e acqua		
			33-45	Sabbia e argilla		
			45-63	Argilla gialla compatta		
			63-76	Argilla e sabbia grossa		
			76-83	Sabbia e acqua		
			83-86	Argilla		
P17 SG NE	1464912	4409134	0-29	Argilla sabbiosa		
			29-31	Sabbia		
			31-41	Argilla compatta grigia		
			41-78	Sabbia e argilla		
			78-80	Sabbia		
			80-126	Argilla		
			76-83	Sabbia		
			126-140	Argilla		
P15 SG NE	1465052	4409378	0-9	Sabbia fine		
			9-13	Argilla		
			13-36	Sabbia fine		
			36-39	Argilla		
			39-43	Sabbia grossa		
			43-48	Sabbia e argilla		
			48-56	Argilla		
			56-68	Sabbia grossa e argilla		
			68-86	Argilla		
			86-92	Ghiaietto		

### Quarta linea B- zona 2

Stratigrafia	Longitudine Est (m)	Latitudine Nord (m)	Profondità (m)	Strato	Quota (mslm)	Falda
P18 SG NE	1466468	4409381	0-8	Argilla grigia e sabbia grossa		
			8-15	Sabbia fine		
			15-19	Sabbia fine e argilla		
			19-21	Sabbia grossa		
			21-26,50	Argilla dura compatta		
			26,50-30	Sabbia fine e argilla		
			30-80	Argilla		
			80-97	Argilla dura		
			97-108	Sabbia e argilla		
			108-122	Argilla compatta		
			122-126	Ghiaietto		
P27SG	1468334	4409092	0-5	Sabbia e ghiaia	3,59	
			5-10	Sabbione-ghiaia		
			10-15	Argilla-sabbia		
			15-19	Sabbione-ghiaia		
			19-37	Argilla-sabbia		
			37-39	Argilla		
			39-52	Sabbia		
			52-56	Sabbione-ghiaia		
			56-67	Argilla-ciottoli		
			67-69	Argilla		
			69-70	Argilla sabbiosa		
			70-75	Ghiaietta-sabbia		
			75-78	Argilla		
			78-84	Ghiaia-sabbia		
			84-90	Argilla		
			90-100	Sabbia-ghiaia		
P28SG	1469684	4409790	0-3	Sabbia	18	
			3-9	Argilla-sabbia		
			9-20	Argilla		
			20-24	Sabbione ciottoli		
			24-45	Argilla-sabbia		
			45-80	Argilla		
			80-85	Ghiaia-sabbione		
			85-90	Argilla		

### Quarta linea C- zona 2

Stratigrafia	Longitudine Est (m)	Latitudine Nord (m)	Profondità (m)	Strato	Quota (mslm)	Falda
P47SG	1470109	4409748	0-14	Argilla sabbiosa		35
			14-15	Sabbione (acqua)		
			15-19	Argilla		
			19-21	Sabbia (acqua)		
			21-28	Argilla		
			28-29	Sabbia fine		
			29-40	Sabbia argillosa		
			40-50	Argilla		
P43SG	1470451	4410050	0-11	Argilla		40
			11-13	Conglomerato		
			13-31	Argilla paglierina		
			31-39	Sabbia fine compatta		
			39-60	Argilla inglobante pietrisco		
			60-62	Sabbione pressato		
			62-80	Argilla scura compatta		
P46SG	1470692	4409769	0-5	Argilla		50
			5-7	Conglomerato argilloso		
			7-10	Conglomerato cementato		
			10-23	Alternanza di argilla e ghiaia		
			23-50	Argilla		

## Quinta linea - zona 2

Stratigrafia	Longitudine Est (m)	Latitudine Nord (m)	Profondità (m)	Strato	Quota (mslm)	Falda
P41Ar	1467837	4406017	0-8	Argilla	7	
			8-20	Sabbia		
			20-30	Argilla		
			30-35	Sabbia con livelli di argilla		
			35-50	Argilla		
P36Ar	1468135	4406030	0-9	Sabbia un po' argillosa acquifera fra 7,50 e 9 m	6,218	
			9-10,20	Argilla		
			10,20-16,80	Sabbia poco argillosa acquifera		
			16,80-26	Argilla		
			26-200	Alternanza di argilla sabbiosa e argilla compatta		
P8Ma	1470220	4405888	0-12	Argilla sabbiosa	27	
			12-17	Sabbia finissima		
			17-27	Argilla grigia		
			27-32	Argilla e sabbia fine		
			32-63	Argilla grigia sabbiosa		
			63-81	Argilla turchina compatta		
			81-92	Argilla turchina		
			92-124	Sabbia fine e argilla		
			124-135	Argilla turchina compatta		
			135-143	Sabbia fine		
P3Ma	1471223	4405866	0-10	Argilla gialla e ciottoli	37,54	
			10-28	Argilla gialla e sabbia grossa		
			28-111	Argilla gialla e sabbia fine		
			111-127	Sabbia e trachite		
			127-176,50	Trachite leggermente fessurata con passaggi d'acqua		
P9Ma	1473393	4406367	0-41	Blocchi di trachite misti ad argilla	99,83	
			41-136	Trachite leggerm.fessurata con passaggi d'acqua soprattnegli ultimi 20m		

## Sesta linea- zona 2

Stratigrafia	Longitudine Est (m)	Latitudine Nord (m)	Profondità (m)	Strato	Quota (mslm)	Falda
P31Ma	1471253	4404105	0-18	Terreno argilloso inglobante sassi		
			18-50	Alternanze di strati di argilla con strati di sabbia e ghiaio. Da 40 a 41 m blocco di trachite		
P22Ma	1472446	4404382	0-87	Trachite in grossi blocchi con interstizi e fessurazioni piene di argilla		
			87-98	Trachite fessurata con acqua		

## Settima linea- zona 2

Stratigrafia	Longitudine Est (m)	Latitudine Nord (m)	Profondità (m)	Strato	Quota (mslm)	Falda
P32Ma	1467962	4402857	0-3,20	Argilla		
			3,20-4,50	Sabbia grossolana acquifera		
			4,50-9,40	Sabbia finissima		
			9,40-16	Sabbia scura e conchiglie		
			16-21,50	Argilla sabbiosa scura		
			21,50-26,70	Argilla plastica scura		
			26,70-28,50	Argilla sabbiosa scura con conchiglie acquiferata		
			28,50-30,20	Sabbia-ghiaietto-conchiglie-acquiferata		
			30,20-32	Argilla torbosa scura-conchiglie		
			32-37,50	Argilla azzurrognola		
			37,50-40	Argilla giallognola		
P33Ma	1468000	4402765	0-4	Sabbia fine		
			4-5	Sabbione con acqua		
			5-17	Sabbia fine poco argillosa con conchiglie		
			17-20	Argilla sabbiosa scura		
			20-28	Argilla scura con conchiglie		
			28-37,50	Sabbia fine argillosa		
			37,50-42	Sabbione con acqua		
			42-52	Alternanza di argilla grigia e gialla		

## Ottava linea- zona 2

Stratigrafia	Longitudine Est (m)	Latitudine Nord (m)	Profondità (m)	Strato	Quota (mslm)	Falda
GC19	1470690	4401510	0-1,8	Terreno vegetale	26,5	
			1,8-3	Argilla compatta		
			3-11	Alluvioni ciottolose a matrice limo-sabbiosa		
			11-18,5	Sabbia a granulometria medio-grossa		
			18,5-20	Sabbia-acqua		
			20-48	Alternanza di argille con rare intercalazioni di livelli ciottolosi		
			48-52	Sabbia a granuli quarzosi		

## Nona linea- zona 2

Stratigrafia	Longitudine Est (m)	Latitudine Nord (m)	Profondità (m)	Strato	Quota (mslm)	Falda
GC78	1472000	4398850	0-5	Deposito ciottoloso argilloso	37	
			5-7	Argilla		
			7-12	Ghiaia-acqua		
			12-30	Argilla		
			30-32	Ghiaia-acqua		
			32-40	Argilla		
			40-41	Livello basaltico		
			41-42	Ghiaia		
			42-48	Argilla giallastra		
			48-50	Argilla rossastra		
			50-96	Banco argilloso con ciottoli		

## Decima linea- zona 2

Stratigrafia	Longitudine Est (m)	Latitudine Nord (m)	Profondità (m)	Strato	Quota (mslm)	Falda
23 Staffa	4397390	1458970	0-2,25	Sabbia fine a matrice siltitica, a tratti compatta, beige	2,4	1,50-10,50 m
			2,25-3,50	Sabbia media beige debolmente carbonatica		
			3,50-5,40	Sabbia media a matrice carbonatica; a 5 m rinvenuto un clasto di arenaria litica, beige		
			5,40-7,30	Arenaria siltitica a cemento carbonatico di colore chiaro		
			7,30-8	Siltite fine con clasti di arenaria siltitica a cemento carbonatico		
			8-8,50	Siltite a matrice argilloso-limosa, debolmente compatta, grigia		
			8,50-10,50	Silt limo-argilloso, compatto, beige		
			10,50-11	Argilla con resti fossiliferi, compatta, grigio-verde		
24 Staffa	4396585	1461330	0-2,40	Arenaria litica a matrice limosa di colore ocraceo	4,3	3,70-7 m
			2,40-3,60	Sabbia media a scarsa matrice limo-argillosa, compatta, umida, di colore grigio-ocra		
			3,60-5,70	Sabbia media a scarsa matrice limo-argillosa, sciolta, di colore grigio		
			5,70-6,10	Arenaria litica a scarsa matrice limo-argillosa, compatta, grigia		
			6,10-7	Sabbia fine scarsamente limo-argillosa, grigio-bruna		
			7-8	Argilla compatta con livelli carbonatici, grigio-verde		
12 Staffa	4397660	1462230	0-1,50	Sabbia grossolana a scarsa matrice, sciolta, beige	7	1,30-4,20 m
			1,50-3,45	Sabbia media sciolta, assenza di matrice, beige		
			3,45-4,20	Sabbia fine compatta a scarsa matrice, beige		
			4,20-4,70	Argilla compatta, plastica, di colore grigio		
25 Staffa	4396175	1463415	0-1	Sabbia media sciolta, assenza di matrice	8,2	1,50-5 m
			1-4,10	Arenaria fine beige		
			4,10-5	Limo argilloso e argilla limosa con clasti di vulcaniti		
			5-5,50	Argilla compatta		

## Zona centrale

Stratigrafia	Longitudine Est (m)	Latitudine Nord (m)	Profondità (m)	Strato	Quota (mslm)	Falda
18 Staffa	1465700	4402770	0-1	Argilla sabbiosa con resti di conchiglie, compatta e plastica	0,7	0,50-4 m
			1-2,50	Argilla limosa, rari resti di conchiglie, compatta, plastica, bruna		
			2,50-4	Argilla con poco limo, resti di conchiglie, plastica, bruno-scura		
19 Staffa	1466665	4402775	0-1,50	Argilla sabbiosa, resti di conchiglie, compatta, bruna, plastica	0,4	1-9 m
			1,50-4	Argilla con poca sabbia, resti di conchiglie, plastica, bruna		
			4-4,50	Argilla sabbiosa, resti di conchiglie, debolmente compatta, bruna		
			4,50-5,70	Sabbia grossolana, matrice limosa, con clasti di arenaria litica, a cemento carbonatico, sciolto, bruna		
			5,70-7,50	Sabbia media a matrice limosa, sciolta, con resti di conchiglie, bruno-scura		

## **Allegato 2**

### **Sondaggi Elettrici Verticali**



## Zona 1

### Quinta linea-zona 1

SEV	Latitudine Nord (m)	Longitudine Est (m)	Profondità (m)	Resistività ( $\Omega \cdot m$ )	Quota (m)	Profondità sondaggio (m)
F1	4406167	1462048	0-2,2	37	2	66
			2,2-6,1	33		
			6,1-8,1	65		
			8,1-24,4	19,90		
			24,4-66	14,30		
			66-...	5,80		
F2	4406126	1463258	0-1,1	1682,00	5	192
			1,1-8,3	114,00		
			8,3-38	39,00		
			38-116	6,90		
			116-192	14,20		
			192-...	7,70		
G14	4406227	1464266	0-1,7	207,00	1	34
			1,7-23,6	26,50		
			23,6-34	82,00		
			34-...	7,20		
G15	4405743	1465678	0-3,8	56,00	7	395
			3,8-13,1	18,80		
			13,1-81	2,20		
			81-395	13,80		
			395-...	21,80		

### Settima linea-zona 1

SEV	Latitudine Nord (m)	Longitudine Est (m)	Profondità (m)	Resistività ( $\Omega \cdot m$ )	Quota (mslm)	Profondità sondaggio (m)
F3	4402537	1461040	0-1,2	51	1	154
			1,2-4,7	32		
			4,7-8,1	73		
			8,1-20,1	19,6		
			20,1-58	10,8		
			58-103	2,5		
			103-154	10,9		
			154-...	2,8		
F4	4402658	1461987	0-1,1	207	3	70
			1,1-2,6	11,9		
			2,6-3,8	56		
			3,8-11,9	64		
			11,9-70	12,9		
			70-...	5,9		
F5	4402638	1463056	0-3	51	4	566
			3-9,9	51		
			9,9-16	166		
			16-353	9,1		
			353-566	18,2		
			566-...	7,8		
G25	4402651	1463690	0-1,1	39	6	113
			1,1-5,3	16,7		
			5,3-10,7	61		
			10,7-42	22,7		
			42-53	43		
			53-113	9,5		
			113-...	5,2		
G26	4402678	1464601	0-1,9	60	5	237
			1,9-3,2	138		
			3,2-14	29,5		
			14-20,3	61		
			20,3-53	11,4		
			53-88	6,5		
			88-237	260		
			237-...	30		

### Ottava linea-zona 1

SEV	Latitudine Nord (m)	Longitudine Est (m)	Profondità (m)	Resistività ( $\Omega \cdot m$ )	Quota (m)	Profondità sondaggio (m)
F6	1459330	4400561	0-4,2	76	1	135
			4,2-13,5	43		
			13,5-83	4,6		
			83-135	12,5		
			135-...	3,1		
F7	1461060	4400561	0-0,9	243	2	761
			0,9-4,3	62		
			4,3-7,6	177		
			7,6-26,7	29,6		
			26,7-130	10,5		
			130-761	4,1		
			761-...	8,7		
F8	1462129	4400581	0-1,1	237	4	25,2
			1,1-11,1	17,3		
			11,1-25,2	77		
			25,2-...	5,8		
F9	1463157	4400601	0-1	302	7	210
			1-25,2	21,2		
			25,2-34	32		
			34-82	9,9		
			82-210	7,5		
			210-...	3,2		
G34	1464184	4400621	0-2,3	48	6	637
			2,3-5,5	40		
			5,5-12,6	12,6		
			12,6-33	14,7		
			33-48	33		
			48-637	5,9		
			637-...	6,5		

### Nona linea A- zona 1

SEV	Latitudine Nord (m)	Longitudine Est (m)	Profondità (m)	Resistività ( $\Omega \cdot m$ )	Quota (mslm)	Profondità sondaggio (m)
H1	1459341	4398746	0-1,2	66	2	312
			1,2-10,4	33		
			10,4-13,7	41		
			13,7-150	7,5		
			150-312	8,8		
			312-...	21,3		
H2	1460227	4398746	0-0,9	330	3	163
			0,9-6,8	68		
			6,8-19,5	17,8		
			19,5-163	4,5		
			163-...	13,9		
H3	1461294	4398824	0-0,9	391	4	223
			0,9-3,5	85		
			3,5-9,8	83		
			9,8-28,2	10,9		
			28,2-77	6,5		
			77-223	6,7		
			223-...	15,3		
H5	1463039	4398746	0-1,7	682	7	526
			1,7-34	24,5		
			34-197	7		
			197-526	9,8		
			526-...	13,8		

### Nona linea B- zona 1

SEV	Latitudine Nord (m)	Longitudine Est (m)	Profondità (m)	Resistività ( $\Omega \cdot m$ )	Quota (mslm)	Profondità sondaggio (m)
J1	1464400	4398493	0-1,2	239	8	218
			1,2-3,3	17		
			3,3-5,9	82		
			5,9-32	16,3		
			32-218	8		
			218-...	13,2		
J2	1465244	4398493	0-0,9	302	5	192
			0,9-3,5	46		
			3,5-27,5	15,1		
			27,5-39	6,2		
			39-51	19,9		
			51-192	6,2		
			192-...	21,7		
J3	1466236	4398493	0-1,2	1698	6	739
			1,2-15,2	44		
			15,2-23,1	73		
			23,1-739	6,1		
			739-...	6,5		

### Zona 2

#### Prima linea-zona 2

SEV	Latitudine Nord (m)	Longitudine Est (m)	Profondità (m)	Resistività ( $\Omega \cdot m$ )	Quota (mslm)	Profondità sondaggio (m)
D1	4416372	1471965	0-1,1	87	7	140
			1,1-6,9	32		
			6,9-12,1	77		
			12,1-84	20,2		
			84-108	15		
			108-140	50		
			140-...	7,1		
D2	4416306	1473456	0-2,1	3,3	16	370
			2,1-13	38		
			13-370	13,2		
			370-...	6		
D3	4416002	1474314	0-1,9	40	20	174
			1,9-10,9	26,6		
			10,9-89	10,1		
			89-174	18,3		
			174-...	25		
E3	4418286	1476224	0-8,3	35	36	786
			8,3-81	8,3		
			81-119	19,5		
			119-261	10,6		
			261-786	21,9		
			786-...	26,7		

### Seconda linea A- zona 2

SEV	Latitudine Nord (m)	Longitudine Est (m)	Profondità (m)	Resistività ( $\Omega \cdot m$ )	Quota (mslm)	Profondità sondaggio (m)
D4	4414141	1471199	0-4	5	7	456
			4-9,4	28,9		
			9,4-47	8,3		
			47-456	132		
			456-...	11,1		
D5	4414009	1472334	0-1,8	11,5	18	1215
			1,8-5,1	44		
			5,1-11,1	7,5		
			11,1-17,4	40		
			17,4-108	11,8		
			108-140	22,3		
			140-592	12,7		
			592-965	13,3		
			965-1215	14,3		
D6	4413864	1473113	0-1,4	10,8	15	564
			1,4-7,1	9		
			7,1-34	8,9		
			34-41	18,5		
			41-116	10,9		
			116-564	17,5		
			564-...	14,4		
			1215-...	37		
D7	4414326	1473958	0-1,3	75	18	531
			1,3-8	11,5		
			8-14,3	28,7		
			14,3-74	8,6		
			74-121	32		
			121-308	10,6		
			308-531	36		
			531-...	11,4		

### Seconda linea B- zona 2

SEV	Latitudine Nord (m)	Longitudine Est (m)	Profondità (m)	Resistività ( $\Omega \cdot m$ )	Quota (mslm)	Profondità sondaggio (m)
E5	4414092	1474853	0-1,4	16,6	32	113
			1,4-6,9	6,7		
			6,9-53	9,5		
			53-113	16,4		
			113-...	21,2		
E4	4414092	1475095	0-3,7	35	35	386
			3,7-15,4	11,9		
			15,4-52	7,8		
			52-386	18,2		
			386-...	16,5		
E6	4413749	1475720	0-1,1	78	46	80
			1,1-7,7	14,8		
			7,7-12,9	35		
			12,9-80	7,4		
			80-...	24		

### Terza linea- zona 2

SEV	Latitudine Nord (m)	Longitudine Est (m)	Profondità (m)	Resistività ( $\Omega \cdot m$ )	Quota (mslm)	Profondità sondaggio (m)
D9	4412038	1470566	0-1,4	673	11	109
			1,4-19,2	20,1		
			19,2-30	38		
			30-66	7,5		
			66-109	32		
			109-...	7,6		
D10	4412131	1471529	0-4,9	124	22	39
			4,9-39	24,5		
			39-...	14,2		
D12	4412104	1474063	0-1,2	42	40	196
			1,2-11,3	4,8		
			11,3-40	7,7		
			40-196	10,3		
			196-...	27,5		
D11	4413068	1474393	0-2	31	30	187
			2-6,2	13,3		
			6,2-16,7	8,4		
			16,7-52	6,9		
			52-187	16,9		
			187-...	36		
E8	4412237	1475841	0-3,2	47	62	802
			3,2-5,1	21,2		
			5,1-8	109		
			8-77	8,4		
			77-802	23,4		
			802-...	23,2		
E7	4412902	1476245	0-2,9	12,6	55	231
			2,9-5,2	2,9		
			5,2-7,2	11,2		
			7,2-23,9	6,8		
			23,9-191	10,4		
			191-213	35		
			213-231	2,3		
			231-...	14,5		

### Quarta linea A- zona 2

SEV	Latitudine Nord (m)	Longitudine Est (m)	Profondità (m)	Resistività ( $\Omega \cdot m$ )	Quota (mslm)	Profondità sondaggio (m)
G1	4409232	1465335	0-1,4	29,2	2	37
			1,4-8,4	17,3		
			8,4-10,1	90		
			10,1-11,4	4,4		
			11,4-37	63		
			37-...	11		
G2	4408909	1466202	0-5,2	84	4	695
			5,2-15,5	51		
			15,5-25,3	36		
			25,3-98	12,8		
			98-695	10,2		
			695-...	10,8		
G4	4409232	1467977	0-1,6	26,8	3	1178
			1,6-10	50		
			10-13,2	66		
			13,2-141	21		
			141-469	7,4		
			469-1178	7		
			1178-...	23,9		
G6	4408667	1469711	0-1,6	209	14	167
			1,6-3,8	40		
			3,8-7	280		
			7-167	13		
			167-...	34		

### Quarta linea B- zona 2

SEV	Latitudine Nord (m)	Longitudine Est (m)	Profondità (m)	Resistività ( $\Omega \cdot m$ )	Quota (mslm)	Profondità sondaggio (m)
G7	4408325	1470961	1-8,4	117	27	896
			8,4-75	18,4		
			75-228	9,8		
			228-896	45		
			896-...	27,7		
G8	4408123	1471949	0-5	112	40	60
			5-16,8	25,4		
			16,8-60	9,9		
			60-...	60		
G10	4408970	1473260	0-4	98	59	173
			4-8,2	20,7		
			8,2-13,6	139		
			13,6-75	19		
			75-173	29		
			173-...	78		

### Quinta linea A- zona 2

SEV	Latitudine Nord (m)	Longitudine Est (m)	Profondità (m)	Resistività ( $\Omega \cdot m$ )	Quota (mslm)	Profondità sondaggio (m)
G17	4405985	1467775	0-1,6	203	2	323
			1,6-14,4	18,1		
			14,4-22,6	34		
			22,6-66	12,4		
			66-323	8		
			323-...	13,1		
G18	4406106	1468904	0-1,5	333	11	322
			1,5-3,2	46		
			3,2-5,3	295		
			5,3-19,2	52		
			19,2-83	12,7		
			83-322	6,5		
			322-...	13		
G19	4406147	1470276	0-1,6	40	27	639
			1,6-13,9	12,6		
			13,9-27,1	18,3		
			27,1-40	32		
			40-175	7,3		
			175-639	30		
			639-...	26,9		

### Quinta linea B- zona 2

SEV	Latitudine Nord (m)	Longitudine Est (m)	Profondità (m)	Resistività ( $\Omega \cdot m$ )	Quota (mslm)	Profondità sondaggio (m)
G20	4405985	1471465	0-2,7	172	45	461
			2,7-11,1	59		
			11,1-23,1	37		
			23,1-94	20,4		
			94-131	57		
			131-327	18,5		
			327-461	69		
			461-...	21,2		
G21	4405824	1472171	0-2	249	58	1368
			2-7,2	45		
			7,2-11,9	11,3		
			11,9-16,4	48		
			16,4-66	21		
			66-307	53		
			307-1368	59		
			1368-...	65		
G23	4406193	1473298	0-3,1	18,3	102	245
			3,1-16,4	7,4		
			16,4-157	108		
			157-245	113		
			245-...	14,5		

### Sesta linea-zona 2

SEV	Latitudine Nord (m)	Longitudine Est (m)	Profondità (m)	Resistività ( $\Omega \cdot m$ )	Quota (mslm)	Profondità sondaggio (m)
G24	4404214	1471918	0-2,1	175	58	343
			2,1-5,4	32		
			5,4-8,8	87		
			8,8-80	36		
			80-261	54		
			261-343	72		
			343-...	14,1		

### Settima linea- zona 2

SEV	Latitudine Nord (m)	Longitudine Est (m)	Profondità (m)	Resistività ( $\Omega \cdot m$ )	Quota (mslm)	Profondità sondaggio (m)
G30	4402495	1468845	0-1,1	135	10	250
			1,1-5,6	26,2		
			5,6-11	91		
			11-51	13,6		
			51-250	5		
			250-...	17,6		
G31	4402443	1469887	0-1,7	6,9	17	290
			1,7-12	59		
			12-17,2	46		
			17,2-290	5,3		
			290-...	26,4		
G32	4402651	1471397	0-1,1	622	40	78
			1,1-6,7	54		
			6,7-17,3	24,7		
			17,3-78	11,7		
			78-...	68		
G33	4402704	1472360	0-2,3	229	62	475
			2,3-13,5	35		
			13,5-43	23,2		
			43-109	168		
			109-475	39		
			475-...	67		

## Ottava linea-zona 2

SEV	Latitudine Nord (m)	Longitudine Est (m)	Profondità (m)	Resistività ( $\Omega \cdot m$ )	Quota (mslm)	Profondità sondaggio (m)
G37	4400699	1467804	0-6,1	33	2	334
			6,1-9,4	50		
			9,4-37	14		
			37-55	5,5		
			55-74	19,8		
			74-334	5,7		
			334-...	12,1		
G38	4401167	1468897	0-1,7		10	28,9
			1,7-7,9	26,2		
			7,9-20,7	20,7		
			20,7-28,9	47		
			28,9-...	6,3		
G39	4401115	1469939	0-1,4	32	17	20,8
			1,4-15,7	21,6		
			15,7-20,8	50		
			20,8-...	6		
G40	4400803	1470746	0-1,1	161	25	329
			1,1-9,6	33		
			9,6-25,9	17,3		
			25,9-131	6		
			131-329	30		
			329-...	8,9		
G41	4400594	1471892	0-2,1	15,7	44	1056
			2,1-8,3	7,8		
			8,3-14,9	19,8		
			14,9-41	9,2		
			41-347	53		
			347-1056	41		
			1056-...	58		
G42	4400803	1472855	0-2,8	30	73	157
			2,8-4,9	66		
			4,9-31	22,9		
			31-37	116		
			37-42	7,2		
			42-157	41		
			157-...	99		

## Nona linea-zona 2

SEV	Latitudine Nord (m)	Longitudine Est (m)	Profondità (m)	Resistività ( $\Omega \cdot m$ )	Quota (mslm)	Profondità sondaggio (m)
J8	4398068	1471651	0-1,1	112	26	204
			1,1-13,1	25,3		
			13,1-78	11		
			78-204	11,2		
			204-...	33		
J9	4398666	1472603	0-1,8	104	45	9,3
			1,8-9,3	36		
			9,3-...	21,3		
J10	4398759	1473611	0-1,6	483	66	76
			1,6-9,5	53		
			9,5-49	26,1		
			49-65	162		
			65-76	10,1		
			76-...	59		



# Decima linea A- zona 2

SEV	Latitudine Nord (m)	Longitudine Est (m)	Profondità (m)	Resistività ( $\Omega \cdot m$ )	Quota (mslm)	Profondità sondaggio (m)
H7	4397001	1460982	0-4,1	39	3	588
			4,1-7,4	117		
			7,4-59	14,7		
			59-196	7,3		
			196-588	4		
			588-...	4		
J11 bis	4397471	1463903	0-3,3	231	7	70
			3,3-8,1	11,4		
			8,1-13,5	35		
			13,5-70	12,4		
			70-...	5,7		
J12	4396500	1464258	0-3	5,5	7	398
			3-6	8,1		
			6-51	3,1		
			51-398	19		
			398...	16,2		
J11	4397415	1464277	0-1,9	150	8	343
			1,9-14,3	13,8		
			14,3-72	22,9		
			72-343	79		
			343-...	1706		
J13	4395548	1464314	0-3,1	9,7	4	312
			3,1-9,3	8,1		
			9,3-40	12,3		
			40-137	9,5		
			137-312	5,4		
			312...	4,9		
J14	4394428	1464482	0-2,2	24	4	219
			2,2-3,8	35		
			3,8-13,3	17,6		
			13,3-21,6	40		
			21,6-219	7,1		
			219...	6,9		

### Decima linea B- zona 2

SEV	Latitudine Nord (m)	Longitudine Est (m)	Profondità (m)	Resistività ( $\Omega \cdot m$ )	Quota (mslm)	Profondità sondaggio (m)
J15	4395025	1467450	0-2,1	18,1	8	256
			2,1-5,2	50		
			5,2-32	21,7		
			32-171	6,8		
			171-256	21,1		
			256-...	7,3		
J16	4395286	1468403	0-3,3	29,4	8	1034
			3,3-20,3	14,6		
			20,3-31	31		
			31-52	5,6		
			52-73	23,3		
			73-1034	7,5		
			1034..	8,5		
J17	4395753	1468963	0-13,7	22,6	10	651
			13,7-35	11,1		
			35-243	8,1		
			243-651	8,1		
			651...	7,3		
J22	4394950	1469168	0-7,7	17,2	10	421
			7,7-19,1	15,6		
			19,1-154	8,6		
			154-336	6,3		
			336-421	17,4		
			421...	5,1		
J18	4395566	1469597	0-3,2	13,2	11	409
			3,2-14,5	11,6		
			14,5-24,2	9,6		
			24,2-52	13,6		
			52-162	8,5		
			162-409	8,7		
			409...	12,9		

### Decima linea C- zona 2

SEV	Latitudine Nord (m)	Longitudine Est (m)	Profondità (m)	Resistività ( $\Omega \cdot m$ )	Quota (mslm)	Profondità sondaggio (m)
J19	4395734	1470848	0-3,3	14,6	11	564
			3,3-34	12,6		
			34-62	9,2		
			62-75	22,8		
			75-145	6,5		
			145-283	9,4		
			283-564	8,5		
			564...	12,6		
J20	4395828	1471968	0-2,2	7,9	12	365
			2,2-6	25,4		
			6-58	10		
			58-128	11,7		
			128-365	17,5		
			365...	21,9		
J21	4396239	1473649	0-2,2	50	25	293
			2,2-8,2	13,4		
			8,2-54	6,8		
			54-293	23		
			293...	45		
K1	4396226	1474564	0-3,4	25,8	32	672
			3,4-8,7	12,4		
			8,7-35	3,7		
			35-109	36		
			109-672	77		
			672...	78		

## **Allegato III**

### **Stratigrafie e SEV dei due tracciati**

# TRACCIATO 1

## Tracciato 1A\_SEV

SEV	Latitudine Nord (m)	Longitudine Est (m)	Profondità (m)	Resistività ( $\Omega \cdot m$ )	Quota (m)	Profondità sondaggio (m)
F1	4406167	1462048	0-2,2	37	2	66
			2,2-6,1	33		
			6,1-8,1	65		
			8,1-24,4	19,90		
			24,4-66	14,30		
			66-...	5,80		
F2	4406126	1463258	0-1,1	1682,00	5	192
			1,1-8,3	114,00		
			8,3-38	39,00		
			38-116	6,90		
			116-192	14,20		
			192-...	7,70		
G14	4406227	1464266	0-1,7	207,00	1	34
			1,7-23,6	26,50		
			23,6-34	82,00		
			34-...	7,20		
G15	4405743	1465678	0-3,8	56,00	7	395
			3,8-13,1	18,80		
			13,1-81	2,20		
			81-395	13,80		
			395-...	21,80		
G16	4406167	1466908	0,8-4,8	2,2	2	391
			4,8-26,4	0,9		
			26,4-55	3,3		
			55-245	14,4		
			245-391	8,1		
			391...	19,3		
G17	4405985	1467775	0-1,6	203	2	323
			1,6-14,4	18,1		
			14,4-22,6	34		
			22,6-66	12,4		
			66-323	8		
			323-...	13,1		

### Tracciato 1B\_SEV

SEV	Latitudine Nord (m)	Longitudine Est (m)	Profondità (m)	Resistività ( $\Omega \cdot m$ )	Quota (m)	Profondità sondaggio (m)
G18	4406106	1468904	0-1,5	333	11	322
			1,5-3,2	46		
			3,2-5,3	295		
			5,3-19,2	52		
			19,2-83	12,7		
			83-322	6,5		
			322-...	13		
G19	4406147	1470276	0-1,6	40	27	639
			1,6-13,9	12,6		
			13,9-27,1	18,3		
			27,1-40	32		
			40-175	7,3		
			175-639	30		
			639-...	26,9		
G20	4405985	1471465	0-2,7	172	45	461
			2,7-11,1	59		
			11,1-23,1	37		
			23,1-94	20,4		
			94-131	57		
			131-327	18,5		
			327-461	69		
			461-...	21,2		
G21	4405824	1472171	0-2	249	58	1368
			2-7,2	45		
			7,2-11,9	11,3		
			11,9-16,4	48		
			16,4-66	21		
			66-307	53		
			307-1368	59		
			1368-...	65		
G23	4406193	1473298	0-3,1	18,3	102	245
			3,1-16,4	7,4		
			16,4-157	108		
			157-245	113		
			245-...	14,5		

## Tracciato 1A\_Stratigrafie

Stratigrafia	Longitudine Est (m)	Latitudine Nord (m)	Profondità (m)	Strato	Quota (mslm)
20 Staffa	1463630	4406455	0-1,80	Sabbia media	5,1
			1,80-3,40	Sabbia grossa	
			3,40-6,60	Sabbia media	
			6,60-10,80	Sabbia grossolana	
			10,80-13,90	Sabbia media	
			13,90-14,40	Sabbia grossolana	
			14,40-17	Sabbia media	
			17-18,50	Sabbia grossolana	
			18,50-18,65	Argilla compatta	
27 Staffa	1464050	4406255	0-1,50	Sabbia fine	4,1
			1,50-2,50	Arenaria fine	
			2,50-6,80	Sabbia media e fine	
			6,80-8,30	Argilla compatta e plastica	
			8,30-10,50	Sabbia grossolana sciolta	
			10,50-14,80	S. fine con progress. aumento della matr. argill.	
			14,80-17,90	S. argillosa e a. sabbiosa	
			17,90-24,80	Sabbia media, grossa e fine	
			24,80-26,60	A. sabbiosa con progr. aumento della compattezza	
26 Staffa	1464475	4406075	0-1,80	Argilla a matrice sabbiosa	5,2
			1,80-4,50	Sabbia media più o meno compatta	
			4,50-5,50	Sabbia grossolana	
			5,50-7	Sabbia media	
			7-15,50	Sabbia grossolana, fine e media	
			15,50-16,20	Arenaria	
			16,20-16,70	Argilla compatta	
P26 Ar	1465337	4405916	0-31	Alternanza di argilla e argilla sabbiosa	3,59266913
			31-35,80	Strato ghiaioso (50cm) poi sabbia	
P37 Ar	1465344	4405774	0-5	Sabbia con argilla	3,16075671
			5-9	Argilla sabbiosa	
			9-16	Sabbia con acqua	
			16-19	Sabbia fine argillosa	
			19-28	Argilla con sabbia	
			28-36	Argilla	
			36-38	Sabbione con acqua	
			38-50	Argilla	

## Tracciato 1B\_Stratigrafie

Stratigrafia	Longitudine Est (m)	Latitudine Nord (m)	Profondità (m)	Strato	Quota (mslm)
23 Staffa	4397390	1458970	0-2,25	Sabbia fine a matrice siltitica, a tratti compatta, beige	2,4
			2,25-3,50	Sabbia media beige debolmente carbonatica	
			3,50-5,40	Sabbia media a matrice carbonatica; a 5 m rinvenuto un clasto di arenaria litica, beige	
			5,40-7,30	Arenaria siltitica a cemento carbonatico di colore chiaro	
			7,30-8	Siltite fine con clasti di arenaria siltitica a cemento carbonatico	
			8-8,50	Siltite a matrice argilloso-limosa, debolmente compatta, grigia	
			8,50-10,50	Silt limo-argilloso, compatto, beige	
			10,50-11	Argilla con resti fossiliferi, compatta, grigio-verde	
24 Staffa	4396585	1461330	0-2,40	Arenaria litica a matrice limosa di colore ocraceo	4,3
			2,40-3,60	Sabbia media a scarsa matrice limo-argillosa, compatta, umida, di colore grigio-ocra	
			3,60-5,70	Sabbia media a scarsa matrice limo-argillosa, sciolta, di colore grigio	
			5,70-6,10	Arenaria litica a scarsa matrice limo-argillosa, compatta, grigia	
			6,10-7	Sabbia fine scarsamente limo-argillosa, grigio-bruna	
			7-8	Argilla compatta con livelli carbonatici, grigio-verde	
12 Staffa	4397660	1462230	0-1,50	Sabbia grossolana a scarsa matrice, sciolta, beige	7
			1,50-3,45	Sabbia media sciolta, assenza di matrice, beige	
			3,45-4,20	Sabbia fine compatta a scarsa matrice, beige	
			4,20-4,70	Argilla compatta, plastica, di colore grigio	
25 Staffa	4396175	1463415	0-1	Sabbia media sciolta, assenza di matrice	8,2
			1-4,10	Arenaria fine beige	
			4,10-5	Limo argilloso e argilla limosa con clasti di vulcaniti	
			5-5,50	Argilla compatta	

## TRACCIATO 2

### Tracciato 2A\_SEV

SEV	Latitudine Nord (m)	Longitudine Est (m)	Profondità (m)	Resistività ( $\Omega \cdot m$ )	Quota (mslm)	Profondità sondaggio (m)
H7	4397001	1460382	0-4,1	39	3	588
			4,1-7,4	117		
			7,4-59	14,7		
			59-196	7,3		
			196-588	4		
			588-...	4		
J11 bis	4397471	1463903	0-3,3	231	7	70
			3,3-8,1	11,4		
			8,1-13,5	35		
			13,5-70	12,4		
			70-...	5,7		
J12	4396500	1464258	0-3	5,5	7	398
			3-6	8,1		
			6-51	3,1		
			51-398	19		
			398...	16,2		
J11	4397415	1464277	0-1,9	150	8	343
			1,9-14,3	13,8		
			14,3-72	22,9		
			72-343	79		
			343-...	1706		
J15	4395025	1467450	0-2,1	18,1	8	256
			2,1-5,2	50		
			5,2-32	21,7		
			32-171	6,8		
			171-256	21,1		
			256-...	7,3		
J16	4395286	1468403	0-3,3	29,4	8	1034
			3,3-20,3	14,6		
			20,3-31	31		
			31-52	5,6		
			52-73	23,3		
			73-1034	7,5		
			1034..	8,5		

### Tracciato 2B\_SEV

SEV	Latitudine Nord (m)	Longitudine Est (m)	Profondità (m)	Resistività ( $\Omega \cdot m$ )	Quota (mslm)	Profondità sondaggio (m)
J17	4395753	1468963	0-13,7	22,6	10	651
			13,7-35	11,1		
			35-243	8,1		
			243-651	8,1		
			651...	7,3		
J22	4394950	1469168	0-7,7	17,2	10	421
			7,7-19,1	15,6		
			19,1-154	8,6		
			154-336	6,3		
			336-421	17,4		
			421...	5,1		
J18	4395566	1469597	0-3,2	13,2	11	409
			3,2-14,5	11,6		
			14,5-24,2	9,6		
			24,2-52	13,6		
			52-162	8,5		
			162-409	8,7		
			409...	12,9		
J19	4395734	1470848	0-3,3	14,6	11	564
			3,3-34	12,6		
			34-62	9,2		
			62-75	22,8		
			75-145	6,5		
			145-283	9,4		
			283-564	8,5		
			564...	12,6		

### Tracciato 2C\_SEV

SEV	Latitudine Nord (m)	Longitudine Est (m)	Profondità (m)	Resistività ( $\Omega \cdot m$ )	Quota (mslm)	Profondità sondaggio (m)
J20	4395828	1471968	0-2,2	7,9	12	365
			2,2-6	25,4		
			6-58	10		
			58-128	11,7		
			128-365	17,5		
			365...	21,9		
J21	4396239	1473649	0-2,2	50	25	293
			2,2-8,2	13,4		
			8,2-54	6,8		
			54-293	23		
			293...	45		
K1	4396226	1474564	0-3,4	25,8	32	672
			3,4-8,7	12,4		
			8,7-35	3,7		
			35-109	36		
			109-672	77		
			672...	78		



## Tracciato 2\_Stratigrafie

Stratigrafia	Longitudine Est (m)	Latitudine Nord (m)	Profondità (m)	Strato	Quota (mslm)	Falda
23 Staffa	4397390	1458970	0-2,25	Sabbia fine a matrice siltitica, a tratti compatta, beige	2,4	1,50-10,50 m
			2,25-3,50	Sabbia media beige debolmente carbonatica		
			3,50-5,40	Sabbia media a matrice carbonatica; a 5 m rinvenuto un clasto di arenaria litica, beige		
			5,40-7,30	Arenaria siltitica a cemento carbonatico di colore chiaro		
			7,30-8	Siltite fine con clasti di arenaria siltitica a cemento carbonatico		
			8-8,50	Siltite a matrice argilloso-limosa, debolmente compatta, grigia		
			8,50-10,50	Silt limo-argilloso, compatto, beige		
			10,50-11	Argilla con resti fossiliferi, compatta, grigio-verde		
24 Staffa	4396585	1461330	0-2,40	Arenaria litica a matrice limosa di colore ocraceo	4,3	3,70-7 m
			2,40-3,60	Sabbia media a scarsa matrice limo-argillosa, compatta, umida, di colore grigio-ocra		
			3,60-5,70	Sabbia media a scarsa matrice limo-argillosa, sciolta, di colore grigio		
			5,70-6,10	Arenaria litica a scarsa matrice limo-argillosa, compatta, grigia		
			6,10-7	Sabbia fine scarsamente limo-argillosa, grigio-bruna		
			7-8	Argilla compatta con livelli carbonatici, grigio-verde		
12 Staffa	4397660	1462230	0-1,50	Sabbia grossolana a scarsa matrice, sciolta, beige	7	1,30-4,20 m
			1,50-3,45	Sabbia media sciolta, assenza di matrice, beige		
			3,45-4,20	Sabbia fine compatta a scarsa matrice, beige		
			4,20-4,70	Argilla compatta, plastica, di colore grigio		
25 Staffa	4396175	1463415	0-1	Sabbia media sciolta, assenza di matrice	8,2	1,50-5 m
			1-4,10	Arenaria fine beige		
			4,10-5	Limo argilloso e argilla limosa con clasti di vulcaniti		
			5-5,50	Argilla compatta		